

UNIVERSIDAD DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS DOCTORAL

**Procesos de interacción aire-agua : coeficientes individuales
de transporte en torres de enfriamiento de agua**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Tomás Gómez-Acebo y López-Doriga

Madrid, 2015



5322350716

PROCESOS DE INTERACCION AIRE-AGUA

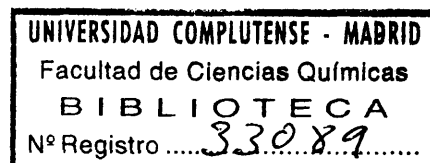
**Coeficientes individuales de transporte en
Torres de enfriamiento de agua**

M E M O R I A

**Que para aspirar el Grado de Doctor en
Química Industrial, presenta**

623434934

Tomás GOMEZ-ACEBO y LOPEZ-DORIGA



Madrid, Noviembre de 1968

ENRIQUE COSTA NOVELLA, Catedrático numerario
de Química Técnica de la Facultad de Ciencias, Sec-
ción de Químicas de la Universidad de Madrid,

CERTIFICO: Que la presente memoria "Procesos
de interacción aire-agua: Coeficientes individuales
de Transporte en torres de enfriamiento de agua"
ha sido realizada bajo mi dirección en el Laborato-
rio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias,
Sección de Químicas de la Universidad de Madrid,
por el Licenciado en Ciencias Químicas D. Tomás
GOMEZ-ACEBO y LOPEZ-DORIGA, y constituye su Tesis
para optar al Grado de Doctor en Química Industrial.

Y para que conste en cumplimiento de la legis-
lación vigente, presento y apadrino ante la Facultad
de Ciencias de la Universidad de Madrid, la referida
Tesis, firmando el presente certificado en

Madrid, 29 de noviembre de 1.968



RECONOCIMIENTO

El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias, Sección de Químicas, de la Universidad de Madrid, bajo la dirección del Profesor D. Enrique Costa Novella quien en todo momento me dirigió y alentó durante el trabajo y a quien sinceramente agradezco sus desvelos y atenciones para que esta investigación se completara debidamente.

Debo agradecer en particular la inestimable ayuda aportada por el equipo del Profesor Santesmases en el Centro de cálculo del Instituto de Electricidad que mediante la programación y el proceso de los datos experimentales en el ordenador IBM-1620 de dicha Instituto, hizo posible la elaboración de los cálculos sistemáticos de este trabajo.

Asímismo agradezco a la Facultad de Ciencias y a la Comisaria de Protección escolar las becas y ayuda económica que me otorgaron para la adquisición del material necesario durante el desarrollo de mi trabajo.

También agradezco a todos los tesinandos que me prestaron su colaboración, su valiosa ayuda, al personal de la Facultad que intervino en el montaje del aparato experimental su trabajo eficiente y a todos los que de una manera más o menos directa han contribuido a que este trabajo se realice y complete su apoyo material y moral.

INDICE GENERAL

=====

Página

TITULO .

CERTIFICADO .

RECONOCIMIENTO .

INDICE GENERAL .

I - RESUMEN	i
II - INTRODUCCION	1
II-1. El agua como agente de refrigeración en la industria	2
II-2. Tipos de enfriadores evaporativos	5
II-3. Tipos de rellenos en las torres de en- friamiento de agua	7
II-4. Evolución del diseño de las torres de enfriamiento de agua	10
II-5. Interés de la presente investigación ...	13
II-6. Ecuaciones fundamentales	14
II-6.1. Balance de materia	14
II-6.2. Balance de calor	15
II-6.3. Transferencia de materia a través del aire	17
II-6.4. Transferencia de calor a través del aire	18
II-6-5. Transferencia de calor a través del agua	20

II-7.	Utilización de las ecuaciones fundamen- tales	20
II-8.	Método simplificado del Potencial Entál- pico	23
II-9.	El Método de Mickley	34
II-10.	Revisión bibliográfica	38
II-11.	Alcance de la presente investigación	44
III -	APARATO	47
III-1.	Situación y disposición general	48
III-2.	La torre de enfriamiento	49
III-3.	Sistema de circulación forzada del aire ...	50
III-4.	Sistema de circulación y calentamiento del agua	51
III-5.	Instrumentos de medida	57
III-6.	Instalación eléctrica y otros accesorios ..	62
III-7.	Descripción del relleno ensayado	62
IV -	PROCEDIMIENTO	66
IV-1.	Preparación del aparato e instrumentos de medida	67
IV-2.	Puesta en marcha de la instalación	72
IV-3.	Comprobaciones periódicas y toma de datos experimentales	75
IV-4.	Procedimiento de cálculo	78

V - RESULTADOS EXPERIMENTALES	82
V-1. Planeamiento de los experimentos	83
V-2. Realización de los experimentos	84
V-3. Presentación de los resultados experi- mentales	88
VI - DISCUSION DE LOS RESULTADOS	126
VI-1. Influencia de la temperatura del agua sobre los coeficientes volumétricos individuales de transporte	127
VI-1.1. Influencia de la temperatura del agua sobre $k'a$	128
VI-1.2. Influencia de la temperatura del agua sobre h_{La}	131
VI-2. Influencia de las condiciones del aire sobre los coeficientes individuales volumétricos de transporte	132
VI-2.1. Influencia de las condiciones del aire sobre $k'a$	133
VI-2.2. Influencia de las condiciones del aire sobre h_{La}	137
VI-3. Influencia de las variables principa- les sobre los coeficientes volumé- tricos individuales de transporte	140
VI-3.1. Planteamiento de la discusión de los resultados	161
VI-3.2. Influencia de las velocidades má- sicas del aire y agua sobre el coeficiente volumétrico indivi- dual de transferencia de materia a través de la fase gaseosa, $k'a$	165

VI-3.2.1.	Análisis de los resultados en es- cala semilogarítmica	166
VI-3.2.2.	Análisis de los resultados en es- cala doblelogarítmica	171
VI-3.2.3.	Ecuación final representativa	177
VI-3.3.	Influencia de las velocidades másicas del aire del aire y agua sobre el coe- ficiente volumétrico individual de transmisión de calor a través de la fase líquida, h_{La}	183
VI-3.3.1.	Análisis de los resultados en es- cala semilogarítmica	183
VI-3.3.2.	Análisis de los resultados en es- cala doblelogarítmica	190
VI-3.3.3.	Ecuación final representativa	199
VI-4.	Estudio de Efectos finales	200
VI-5.	Comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los encontrados en la bibliografía	203
VII	- CONCLUSIONES	205
VIII	- RECOMENDACIONES	211
IX	- APENDICE	213
IX-1.	<u>DETALLES DEL APARATO</u>	214
IX-1.1.	Prueba de capacidad del ventilador	214
IX-1.2.	Medida del caudal de aire	216
IX-1.2.1.	Diseño y construcción del ventu- rímetro	216
IX-1.2.2.	Factor de corrección F para las con- diciones reales del aire	218
IX-1.2.3.	Calibrado del venturímetro	219

IX-1.3.	Medida del caudal de agua	225
IX-1.4.	Medida de temperaturas. Calibrado de los termómetros	232
IX-1.5.	Medida de la humedad del aire	235
IX-1.5.1.	Procedimientos de medida de la humedad ..	235
IX-1.5.1.1.	Higrómetros de cabello	236
IX-1.5.1.2.	Psicrómetros de termómetro seco y húmedo	237
IX-1.5.1.3.	Determinación de la temperatura de rocío	238
IX-1.5.1.4.	Higrómetros conductimétricos	239
IX-1.5.1.5.	Higrómetros electrolíticos por con- ductimetría o columbimetría de sa- les fuertemente higroscópicas	239
IX-1.5.1.6.	Higrómetros electrolíticos para de- terminación de la temperatura de rocío	240
IX-1.5.1.7.	Higrómetros por medida de calores de adsorción/desorción de la hume- dad sobre sales higroscópicas	241
IX-1.5.2.	Elección, diseño, construcción y com- probación de los psicrómetros	242
IX-1.5.3.	Datos psicrométricos. Corrección de la presión	249
IX-1.5.4.	Prueba de comprobación de los psicró- metros	254
IX-2.	<u>DETALLES DEL PROCEDIMIENTO</u>	256
IX-2.1.	Desarrollo del programa elaborado para el cálculo de los coeficientes de trans- porte por el método de Mickley mediante el Sistema IBM-1620	256
IX-2.1.1.	Ecuación de la curva de equilibrio	262
IX-2.1.2.	Lenguaje y partes del programa	267
IX-2.1.3.	Lo que hacen los programas	267

IX-2.1.4.	Instrucciones para operar con los programas	274
IX-2.1.5.	Selección de la función $ig_i = f(t_i, \pi)$ en cada caso	275
IX-2.2.	Lista de los puntos rutinarios a comprobar para la realización de un experimento completo	285
IX-2.3.	Cálculo completo de un experimento	290
IX-2.4.	Procedimiento de cálculo por mínimos cuadrados "ponderados" seguido para obtener una ecuación representativa ...	307
IX-2.5.	Cálculo de errores	310
IX-2.6.	Localización de los datos experimentales	315
X	- NOMENCLATURA	316
XI	- INDICE DE ECUACIONES	322
XII	- INDICE DE FIGURAS	333
XIII	- INDICE DE TABLAS	338
XIV	- BIBLIOGRAFIA	342

I - R E S U M E N

=====

La presente Memoria describe la investigación desarrollada con objeto de estudiar los coeficientes volumétricos de transferencia de materia y transmisión de calor de un relleno industrial típico utilizado comúnmente en torres de enfriamiento de agua. El disponer de dichos coeficientes volumétricos de transporte en función de las diversas variables que pueden influir en el proceso de interacción aire-agua de una torre de enfriamiento, permite dimensionar dicha torre y predecir las condiciones de funcionamiento.

Se realizó el estudio completo de un tipo de relleno para establecer un procedimiento sistemático que permitiera la obtención ulterior de los coeficientes volumétricos de transporte para todo tipo y disposición de elementos de relleno utilizados comúnmente en la industria, para lo cual se montó el equipo experimental necesario, se construyeron

todos los tipos representativos de elementos de relleno de forma prismática (listones) así como los marcos necesarios para permitir disponerlos según las múltiples formas prácticas en uso, y se preparó un programa completo de cálculo en lenguaje FORTRAN que permite obtener los coeficientes volumétricos individuales de cualquier tipo de relleno a partir de los datos experimentales de un ensayo según el método entálpico de Merkel-Mickley, por medio de un ordenador electrónico tipo IBM-1620.

El proyecto de una torre industrial de enfriamiento de agua ha de orientarse forzosamente a conseguir un funcionamiento eficiente y económico, un costo inicial bajo y unos gastos de operación y mantenimiento mínimos de la torre. Todos los diseños constructivos de torres industriales de enfriamiento de agua buscan en efecto obtener la mayor capacidad de enfriamiento posible compatible con unas pérdidas de agua por arrastre mínimas, unos costes energéticos de bombeo de agua y movimiento de aire mínimos, en un volumen mínimo de espacio ocupado y con unos materiales de bajo precio y larga vida. La función del relleno es permitir que el agua que desciende libremente por la torre y el aire se pongan en contacto y que la superficie de interacción entre ambos sea máxima.

La torre se ha de construir por tanto para acomodar de la forma más económica posible el relleno o parte activa de la misma y permitir la interacción aire-agua. El relleno "económico" es siempre un compromiso entre el material, su forma y disposición, para permitir que la interacción sea máxima, y mínimos la pérdida de agua por pulverización, la altura del relleno, la pérdida de carga del aire a su través y su coste inicial y de mantenimiento.

Los fenómenos de interacción aire-agua que ocurren en una torre de enfriamiento de agua son de dos tipos: uno de transmisión de calor desde el seno del agua a la interfase agua-aire y desde ésta al seno del aire en movimiento; otro de transferencia de materia desde la superficie del agua en circulación al seno del aire en movimiento. Son tres, por tanto las "resistencias" que influyen en la dinámica del proceso expresable por medio de tres ecuaciones de velocidad de transmisión de calor y transferencia de materia, cada una de las cuales refleja los fenómenos individuales de transporte teniendo como parámetros la superficie de interacción aire-agua y los coeficientes individuales k' , h_G y h_L . Dichos parámetros dependen del tipo de relleno y de las condiciones de operación del proceso. En la práctica y debido a que la superficie de interacción aire-agua típica del relleno no es una función simple de la superficie real de los elementos que lo forman, se utilizan los coeficientes volumétricos de transpor-

te correspondientes, $k'a$, k_Ga y k_La .

El procedimiento utilizado en esta investigación para evaluar los coeficientes volumétricos, fué el método entálpico de Merkel(1) - Mickley(2) por el que mediante los datos obtenidos en un experimento de enfriamiento de agua, teniendo en cuenta la relación de Lewis (3) para el caso aire-agua, y asegurándose de que las áreas útiles para la transmisión de calor, a_H , y transferencia de materia, a_M , son idénticas (todo el relleno se encuentra "mojado") pueden obtenerse los tres coeficientes individuales volumétricos mencionados.

Para que el método de Mickley pueda ser empleado es sin embargo necesario que el aire no se encuentre saturado de agua al abandonar el relleno en la parte superior de la torre. Este hecho limita las condiciones de operación de los ensayos pero permite de todas formas obtener datos prácticos de dichos coeficientes con los que poder diseñar una torre de enfriamiento, aunque en la práctica ocurra que el aire que las atraviesa salga frecuentemente saturado de agua.

En efecto no resulta económico diseñar las torres de enfriamiento de agua imponiendo la condición de que el aire no alcance la saturación a la salida de las mismas, ya que esto limitaría mucho su capacidad de enfriamiento de agua. De

hecho en la parte inferior de la torre el potencial enfriador del aire, al estar éste seco, es máximo y va disminuyendo conforme atraviesa el relleno al ir aumentando su humedad; pero no se anula sólo por el hecho de que llegue a saturarse en algún "punto" de la torre ya que también puede ir aumentando la temperatura del aire, y con ello admitir más humedad al irse calentando aquél por contacto con agua descendente a una temperatura superior. Lo que sí ocurre es que, a partir de ese "punto" el aire se mantiene saturado.

Todos los experimentos de esta investigación se realizaron asegurándose que el aire no alcanzaba la saturación en ninguna parte de la torre. El fenómeno de la saturación se aprecia claramente por la formación de nieblas. Estas nieblas se explican por la sobresaturación que ocurre a las capas de aire próximas a la interfase agua-aire caliente y en "cuasi-equilibrio" de saturación, al alejarse de la interfase y pasar a la masa principal que está saturada pero más fría, lo que produce condensaciones en forma de niebla.

Para realizar los experimentos se construyó una torre semi-industrial de enfriamiento de agua, tratándose especialmente de evitar los "efectos finales" de enfriamiento en la parte inferior de la torre por debajo del relleno a fin de obtener los coeficientes volumétricos específicos del relleno ensayado. También se cuidó particularmente el adiabatismo de la torre, y se dispusieron la entrada y salida del

aire de la torre a suficiente distancia para impedir la recirculación del aire húmedo. Se cuidó, asimismo, obtener la máxima precisión de los datos experimentales mediante tomas dobles de temperaturas en los puntos de posible mayor dispersión, y se construyeron especialmente los psicrómetros para medidas de la humedad de aire cuidándose que las tomas de muestra fueran verdaderamente representativas, particularmente en la parte superior del relleno donde el aire que abandona la torre puede arrastrar mecánicamente gotas de agua y falsear los datos.

Como comprobación previa de la validez de los datos experimentales de cada ensayo, se desecharon en principio aquéllos experimentos en los que el balance entálpico aire-agua registraba un error superior al 10 %. Es de notar que en los ensayos y pruebas realizados sistemáticamente en torres industriales de enfriamiento de agua con objeto de estudiar su eficacia, y en los que al aire a la salida se considera saturado midiéndose solamente su temperatura húmeda, se encuentran errores del 20 al 50 % y en algunos casos cercanos al 100 %. (Datos de 30 experimentos realizados por el "Cooling Tower Institute" (4).

El bloque de experimentos que constituyen la parte fundamental de este trabajo está constituido por un programa de ensayos con un determinado tipo de relleno, funcionando

en régimen de mojado de película superficial (no de goteo), estudiándose la influencia que sobre los tres coeficientes volumétricos individuales de transporte tienen las variables principales (velocidad másica del aire y velocidad másica del agua) y las variables secundarias (temperatura media del agua; entalpía, humedad y temperatura media del aire) realizando además un número de experimentos con altura reducida del relleno para evaluar y comprobar la ausencia práctica de efectos finales en las condiciones normales (no extremas) de operación de la torre.

Como condiciones de ensayo para los caudales de aire y agua se tomaron aquellas que cubrían toda la gama práctica utilizada normalmente para rellenos de rejillas de madera, comprobándose en todo caso que el mojado del relleno era total, sobre todo en condiciones de bajo caudal de mojado.

Parte importante del enfoque de este trabajo fue la preparación de un programa en lenguaje FORTRAN para resolver sistemáticamente y con exactitud, mediante un ordenador electrónico tipo IBM-1620, los tanteos gráficos de la "construcción de Mickley". Además de la exactitud en la resolución de los cálculos el programa preparado permitía estudiar la influencia del error de los datos experimentales en los resultados finales. Siendo la temperatura seca del aire a la salida una de las variables experimentales más sujetas a error se

podieron obtener sistemáticamente los límites máximo y mínimo del valor de los tres coeficientes volumétricos de transporte en función del error de esa temperatura, adoptándose como parámetro un valor de la misma comprendida en un intervalo $(t-0.05^{\circ}\text{C}) < t < (t + 0.05^{\circ}\text{C})$.

El equipo experimental montado y el programa preparado están a punto para realizar estudios sistemáticos con los diferentes tipos de rellenos industriales contruídos, estudiándolos desde un punto de vista económico (coste inicial contra eficacia y gasto de energía en el ventilador, etc.).

En la discusión de los resultados se dan las ecuaciones generales halladas para los coeficientes volumétricos de transporte en función de las variables principales para el relleno ensayado y se comparan los valores conseguidos en este trabajo con otros descritos en la Bibliografía.

II - INTRODUCCION

II - I N T R O D U C C I O N =====

II-1.

El agua como agente de refrigeración en la Industria.

Los medios refrigeradores más empleados en la industria son tres: el aire, el agua dulce y el agua del mar. Cada uno de ellos tiene unas características que lo pueden hacer preferible a los otros dos por razones de localización de la industria o del proceso en que interviene.

A un medio refrigerador (m.r.) se le exige que sea abundante, barato, que tenga una capacidad calorífica alta y que no produzca alteraciones en el equipo de proceso. Sin duda ninguna el m.r. más abundante y barato es el aire pero debido a su baja capacidad calorífica obliga a emplear grandes volúmenes en el proceso con lo que los equipos de intercambio de calor han de ser forzosamente voluminosos y costosos de primera instalación; además la temperatura del aire suele ser superior a la del agua corriente y por tanto el salto térmico es

menor.

Para aquellas industrias situadas en las cercanías de una costa marítima el agua de mar reúne las condiciones de medio de refrigeración abundante, barato y de gran capacidad calorífica, pero tiene el inconveniente de obligar al empleo de materiales metálicos resistentes a la corrosión y necesita además un tratamiento químico previo para eliminar riesgos de obstrucción de las instalaciones por formación y crecimiento de algas.

El agua dulce es por tanto el medio refrigerador generalmente más conveniente en la industria, y entre las consideraciones que han de tenerse en cuenta para estudiar la situación óptima de una industria figura la de su disponibilidad en cantidad y calidad suficientes. El agua se utiliza directamente en la industria para diversos fines pero la mayor proporción se destina como medio refrigerador para absorber calor.

La forma más simple de emplear el agua corriente como elemento de refrigeración consiste en hacerla pasar una sola vez por el equipo a enfriar, pero así se tiene una baja utilización y una capacidad de enfriamiento baja, agravada por el pequeño salto térmico disponible. Esta forma de enfriamiento resulta impracticable y poco económica, y por ambas

razones y la cada vez mayor escasez de agua corriente, se ha establecido la obligatoriedad de su utilización en circuito cerrado incluso para pequeñas instalaciones, actuando entonces el agua como fluido intermedio de transmisión de calor entre la instalación a refrigerar y el aire exterior.

El uso del aire que como medio externo de refrigeración no puede, en ocasiones, emplearse directamente en forma económica, encuentra una amplia aplicación en el enfriamiento del agua por la elevada capacidad de transmisión de calor entre el agua circulante y el aire de los equipos de contacto directo aire-agua que utilizan el principio del enfriamiento evaporativo del agua.

Los primeros tipos de enfriadores evaporativos de agua circulante fueron simples depósitos artificiales abiertos y elementos de listones de madera apilados. La necesidad de un enfriamiento más efectivo y un diseño más compacto de los enfriadores de agua condujo al empleo de enfriadores cerrados con ventilación, a la pulverización del agua, al empleo de rellenos compactos, etc.

Existen múltiples tipos de enfriadores evaporativos que van desde las balsas de enfriamiento, con o sin pulverizadores de agua, a las torres de enfriamiento de agua de tiro natural o tiro mecánico (aire forzado o inducido).

II.2.

Tipos de enfriadores evaporativos.

Las condiciones para el enfriamiento evaporativo del agua son más favorables cuanto mayor es la superficie libre de agua para el intercambio de calor con el aire y mayor es la cantidad y velocidad del aire en contacto con la superficie libre del agua. Los enfriadores evaporativos de agua pueden clasificarse según los métodos utilizados para aumentar la superficie libre del agua y para intensificar el contacto con el aire.

Los métodos para aumentar la superficie libre del agua útil al intercambio de calor y materia con el aire son por pulverización y por relleno. Los de relleno pueden ser de goteo o de película. Existen enfriadores que combinan el relleno de goteo o película con la pulverización del agua: son los enfriadores mixtos.

Según el sistema seguido para favorecer la interacción del aire sobre la superficie libre del agua, hay diversos tipos de enfriadores: abiertos con circulación cruzada del aire atmosférico; cerrados con tiro natural (chimenea de descarga para favorecer el tiro) y cerrados con ventilación mecánica, con ventiladores para introducir el aire en el relleno (torres de tiro forzado) o para aspirar el aire a su través (tiro inducido); también existen enfriadores de tiro combinado, natu-

ral más mecánico.

En general los enfriadores más utilizados son (5) del tipo cerrado -"torres" de enfriamiento de agua- siendo más frecuentes las grandes torres de tiro natural y las compactas de tiro forzado con ventiladores laterales y de tiro inducido con ventiladores en la parte superior; existen variantes de torres de tiro mecánico con circulación cruzada o en contracorriente. Las grandes torres utilizan por lo general rellenos de goteo, y las menores rellenos compactos de película. Los pulverizadores tienen la ventaja de una gran dispersión del agua pero ésto va acompañado de una mayor potencia necesaria para el bombeo y mayores pérdidas de agua en el aire a la salida.

A menudo se tienen también en cuenta en los diseños constructivos el sentido de los vientos dominantes y la dirección de los rayos del sol, ya que se puede favorecer estadísticamente la circulación forzada del aire por el relleno, la menor proporción de aire húmedo recirculado y un bajo recalentamiento de la pared más expuesta al sol si por ella se realiza la admisión del aire atmosférico.

Las pérdidas del agua recirculada y su importancia relativa son un factor importante en la selección del tipo de torre de enfriamiento de agua más conveniente según un crite-

rio económico. Estas pérdidas son de tres tipos: pérdidas normales por evaporación, que oscilan entre un 2 % y un 4 % del agua recirculada; pérdidas necesarias por purga para controlar el bajo nivel de sales en el agua de recirculación y que dependiendo de la calidad del agua pueden variar entre el 1 % y el 3 % de la recirculación; y pérdidas de agua pulverizada arrastrada por el aire, que varían en gran manera según el sistema de dispersión de agua utilizado: así los enfriadores de pulverización pueden llegar a tener pérdidas sistemáticas por arrastre del 2 % al 3,5 % de la recirculación; en las torres de enfriamiento de agua con tiro natural las pérdidas por arrastre oscilan del 0,5 % al 1 %. Para evitar estas pérdidas por arrastre las torres de tiro forzado o inducido tienen siempre eliminadores de arrastre en los que se retienen las gotas de agua arrastradas por el aire con lo que las pérdidas totales por arrastre resultan generalmente inferiores al 0,3 % de la recirculación.

II.3.

Tipos de rellenos en las torres de enfriamiento de agua.

Los rellenos utilizados en las torres de enfriamiento de agua pueden clasificarse en dos tipos: rellenos de goteo y rellenos de película.

Los rellenos de goteo están contruidos por múltiples listones, generalmente de madera, dispuestos en elementos co-

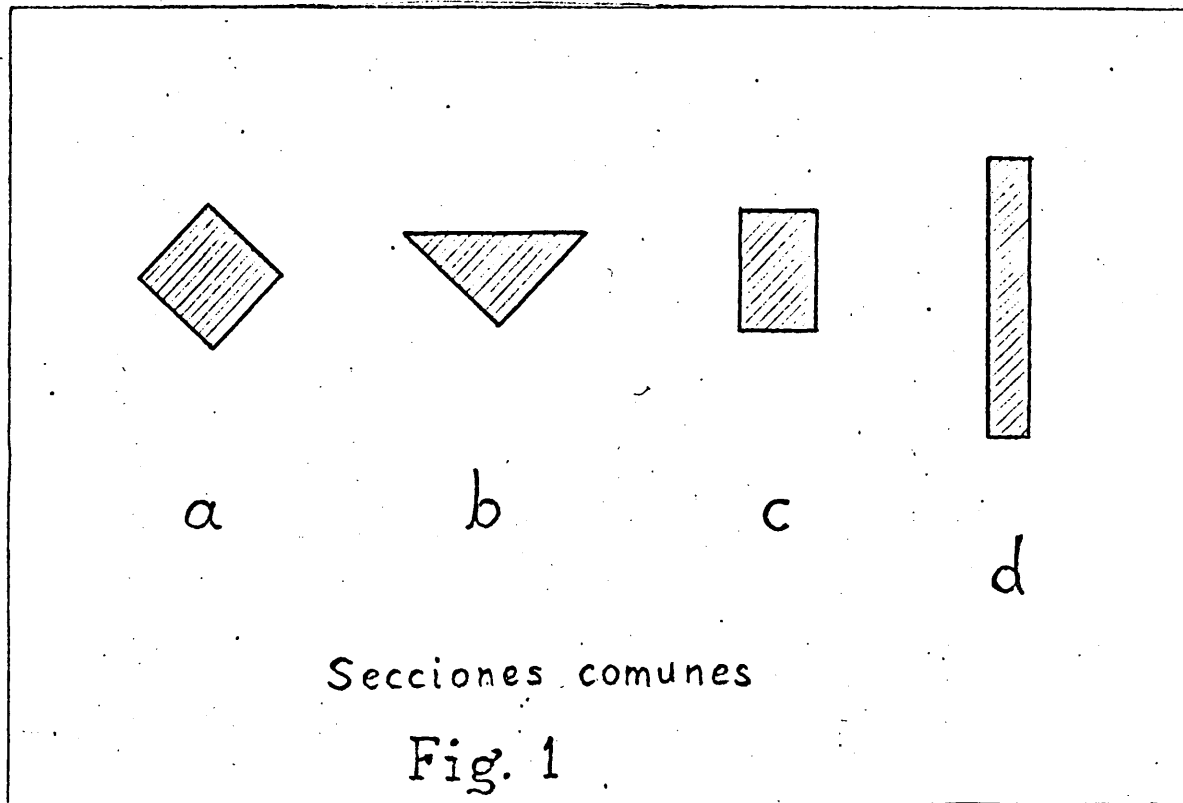
munes de sostén distanciados entre sí entre 25 y 50 cm. para formar pisos superpuestos. Los listones están dispuestos para romper el curso de las gotas de agua cayendo de un elemento de relleno al inmediato inferior y producir su división en nuevas gotas de agua con superficie de intercambio renovada. En este tipo de rellenos la superficie libre activa de interacción aire-agua está constituida principalmente por las gotas de agua cayendo de un elemento de relleno al siguiente y dispersándose de nuevo al chocar con los listones.

Las ventajas principales de estos tipos de relleno están en su bajo coste, escasa pérdida de carga del aire, robustez, simplicidad y larga vida. Sus inconvenientes, comparándolos con los rellenos de película, son un menor rendimiento volumétrico, que se refleja en un mayor tamaño de la torre, al ser menor el tiempo de contacto del agua con el aire por metro cúbico de relleno.

Los rellenos de película están constituidos por elementos de relleno por los que el agua resbala en su caída de forma que la superficie de intercambio aire-agua guarda relación con la superficie geométrica del relleno. Normalmente los rellenos industriales de película se forman por elementos de listones de madera (o plástico) en pisos superpuestos en cruz. Por su mayor rendimiento volumétrico puede compensar su mayor coste inicial por metro cúbico de relleno sobre los rellenos de goteo.

La sección geométrica de los listones que constituyen los elementos de relleno busca, en los rellenos a goteo, una resistencia mecánica a la flexión compatible con una superficie grande a las gotas de agua cayendo, y en los de película se busca la anchura mínima de los listones compatible con la resistencia al deterioro y deslignificación progresiva.

La figura 1 representa las cuatro secciones geométricas de listones más frecuentes utilizadas en rellenos industriales de goteo y película. Todas ellas se utilizan en rellenos



de goteo y el tipo d tanto en rellenos de goteo como de película. También existen rellenos que combinan elementos de película intercalados con otros de goteo para redistribuir el agua y evitar así la formación de canales preferentes de flujo.

Además de la sección geométrica de los elementos de relleno, se han buscado disposiciones múltiples que combinan la orientación y separación de unos listones respecto a otros del mismo elemento constructivo así como disposiciones especiales, por grupos oblicuos, con diferente separación entre los distintos elementos superpuestos, etc.

II.4.

Evolución del diseño de las torres de enfriamiento de agua.

Los primeros diseños de torres de enfriamiento de agua se basaban en la experiencia previa como factor clave y no había uniformidad de procedimientos para analizar y relacionar datos experimentales, utilizándose el sistema de extrapolación simple. Hasta Robinson (6) en 1.922 y Mac Adams, Walker y Lewis (7) en 1.923 no se desarrollaron ecuaciones básicas para las operaciones de transmisión de calor y transferencia de materia que ocurren en los procesos de interacción aire-agua, pero considerando ambos procesos como independientes uno del otro.

Merkel (1) en 1.925 estableció la similitud entre el comportamiento del termómetro húmedo y los procesos de enfriamiento evaporativo del agua en una torre industrial de enfriamiento, estableciendo y utilizando la entalpía como fuerza impulsora global única del proceso por la diferencia existente entre la del aire saturado de la interfase agua-aire y la del seno del aire, teniendo en cuenta ciertas suposiciones simplificadoras:

1ª. La relación de Lewis entre el calor específico del aire húmedo y los coeficientes de transmisión de calor y transferencia de materia de la fase gaseosa.

2ª. El considerar constante a lo largo de la torre el caudal de agua, despreciando la reducción de masa debida a evaporación.

3ª. El equiparar la temperatura húmeda del aire a la temperatura de saturación adiabática.

4ª. El despreciar la resistencia a la transmisión de calor de la fase líquida, con lo que se supone que el aire en la interfase aire-agua se encuentra saturado y a la temperatura de toda la masa de la gota de agua.

Desde Lichtenstein (8) en 1.934, se viene utilizando el método de Merkel del potencial entálpico como el más sencillo a efectos prácticos para diseñar torres de enfriamiento.

to de agua, mediante el empleo de un "coeficiente global de transferencia" referido a la fuerza impulsora entálpica. Aunque este procedimiento supone nula la resistencia a la transmisión de calor de la fase líquida suele dar resultados suficientemente satisfactorios en el diseño del volumen o altura de relleno necesario para una torre cuando se conoce el coeficiente global de transferencia del tipo de relleno a utilizar, y las condiciones de operación no están demasiado alejadas de las que presidieron la determinación experimental del coeficiente global entálpico.

Sin embargo, aunque en la práctica continúa utilizándose el método del potencial entálpico simplificado mediante el uso de coeficientes globales, la resistencia a la transmisión de calor de la fase líquida se ha comprobado por varios investigadores que no es despreciable y puede conducir a errores sustanciales en el cálculo de torres de enfriamiento de agua. Kelly y Swenson (20), Jackson (21) y otros han comprobado experimentalmente la existencia de una resistencia de la fase líquida a la transmisión de calor. Mac Adams (9) ideó un método de cálculo, que tenía en cuenta dicha resistencia, para determinar el verdadero valor de las condiciones interfaciales y Mickley (2) propuso un método, basado en los trabajos de Merkel (1) y Mac Adams (9) que permite calcular las torres de enfriamiento teniendo en cuenta el valor de los coeficientes individuales de transporte $k'a$ y h_{La} para el tipo

de relleno en cuestión y en las condiciones previstas de funcionamiento.

II.5.

Interés de la presente investigación.

El método de cálculo para torres de enfriamiento de agua propuesto por Mickley es más laborioso que el método entálpico simplificado pero, indudablemente es más científico y por tanto más exacto. Requiere sin embargo el conocer previamente los coeficientes individuales de transporte $k'a$ y h_a para el relleno en cuestión y en las condiciones previstas de funcionamiento.

Por ser muy escasa en la bibliografía la información disponible sobre estos coeficientes individuales para diferentes tipos de relleno, tanto de goteo como de película, obtenidos por el propio método de Mickley a partir de los datos de experimentos individuales simples en que el aire no llega a saturarse, se juzgó conveniente investigar sistemáticamente los diferentes tipos de elementos de relleno existentes en el mercado y las diferentes disposiciones de los elementos individuales en el relleno total, en diferentes condiciones de funcionamiento (régimen de goteo, de película o mixto), condiciones del agua y condiciones del aire, para cubrir en lo posible todo el campo práctico de aplicación de estos rellenos con datos reales obtenidos experimentalmente

con una torre piloto representativa.

II.6.

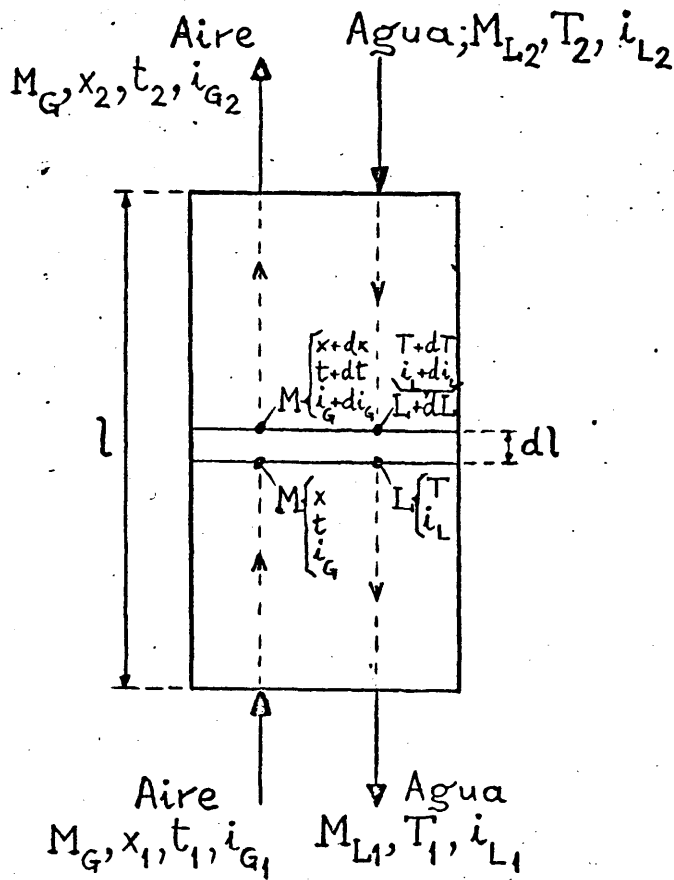
Ecuaciones fundamentales.

El proceso de interacción aire-agua que ocurre en el interior de una torre de enfriamiento de agua en contracorriente y funcionando adiabáticamente puede representarse por dos ecuaciones para los balances de materia y calor, y tres ecuaciones de transporte para las velocidades de transmisión de calor del seno del agua a la interfase y de la interfase al seno del aire, y de transferencia de materia desde la interfase al seno del aire.

Considerando un elemento diferencial de altura dl de una columna de relleno de sector S y altura l (Figura 2), las ecuaciones fundamentales que rigen el fenómeno son las siguientes:

II.6.1. Balance de materia: Existe transferencia de materia desde la interfase aire-agua al seno del aire por evaporación. El agua evaporada dM_L pasa al aire aumentando su humedad en dx :

$$dM_L = M_G dx \quad (1)$$



Esquema del proceso de Interacción AIRE-AGUA.

Fig. 2

II.6.2. Balance de calor: Considerando que el funcionamiento de la columna es adiabático (no hay transmisión de calor a través de las paredes de la torre) el calor cedido por el agua será absorbido por el aire:

$$M_G di_G = d(M_L i_L) = M_L di_L + i_L dM_L \quad (2)$$

pero

$$i_G = r_0 x + st \quad (3)$$

y

$$i_L = C_L T \quad (4)$$

siendo r_0 el calor latente de vaporización del agua a 0°C y C_L su calor específico, y tomando como temperatura de referencia para el cálculo de las entalpías 0°C . Por tanto

$$di_G = r_0 dx + sdt + tds \quad (5)$$

$$di_L = C_L dT + T dC_L \quad (6)$$

Como las variaciones de los calores específicos del aire y del agua, ds y dC_L , así como la variación del caudal de agua son muy pequeñas y de segundo orden frente a las otras variables, es decir,

$$\bar{M}_L = \frac{M_{L1} + M_{L2}}{2} \quad (7)$$

se puede admitir, sin introducir error apreciable en el balance entálpico, (inferior al 2 %), que:

$$M_G r_0 dx + M_{Gs} dt = M_G di_G = \bar{M}_L C_L dT \quad (8)$$

II.6.3. Transferencia de materia a través del aire: Representando por a_M la superficie de contacto entre ambas fases por unidad de volumen útil para la transferencia de materia, en el elemento de volumen considerado la superficie de contacto será

$$d A_M = a_M S dl \quad (9)$$

Recordando la ecuación básica de transferencia de materia, resulta:

$$N_v = \frac{M_G dx}{18 dA_M} = \frac{M_G dx}{18 a_M S dl} = k_G (p_i - p) \quad (10)$$

siendo N_v el caudal molar de vaporización por unidad de superficie, k_G el coeficiente individual de transferencia de materia a través de la fase gaseosa, p_i la presión de vapor de agua en el aire saturado a la temperatura de la interfase y p la presión de agua en la masa global de aire.

Recordando la proporcionalidad existente entre presiones parciales del agua y humedad del aire,

$$p - p_i = \frac{29}{18} (\pi - p)_{ml} (x - x_i) \quad (11)$$

en que π representa la presión total, la ecuación (10) puede ponerse en la forma siguiente:

$$M_G dx = a_M S \cdot dl \cdot k_G \cdot 29(\pi - p)_{ml} (x_i - x) \quad (12)$$

y llamando a

$$k_G \cdot 29(\pi - p)_{ml} = k' \quad (13)$$

queda de la forma simplificada la ecuación de velocidad de transferencia de materia a través de la fase gaseosa:

$$M_G dx = k' a_M S \cdot dl (x_i - x) \quad (14)$$

II.6.4. Transmisión de calor a través del aire: A través de la fase gaseosa se produce una transmisión de calor por dos mecanismos: calor sensible por conducción y convección debido a la diferencia de temperatura entre la interfase y el seno del aire y calor latente debido a la transferencia de materia por vaporización del agua al existir diferencia de humedad entre el aire saturado de la interfase y el seno del aire. Corres-

ponde a los dos términos primeros en la ecuación (8)

$$M_G s \, dt + M_{Gr0} \, dx = \bar{M}_L C_L \, dT$$

Llamando a_H la superficie de relleno por unidad de volumen útil para la transmisión de calor, la ecuación básica de transmisión de calor sensible será:

$$M_G s \, dt = h_C a_H S \, dl \, (t_i - t) \quad (15)$$

en la que h_C es el coeficiente individual de transmisión de calor a través de la fase gaseosa por conducción y convección.

El calor latente transmitido se deduce de la ecuación (14), multiplicando ambos miembros por r_0 (calor latente de vaporización del agua a 0°C):

$$r_0 M_G \, dx = r_0 k' a_M S \, dl \, (x_i - x) \quad (16)$$

recordando (5) que

$$di_G = s \, dt + t \, ds + r_0 \, dx \simeq s \, dt + r_0 \, dx \quad (17)$$

pues la variación del calor húmedo, es decir, el término t_{ds} , es despreciable frente a las variaciones de t y x , resulta que el calor total transmitido es:

$$M_G s dt + M_{Gr} dx = M_G di_G = h_{caH} S_{dl} (t_i - t) + r_0 k' a_M S_{dl} \cdot (x_i - x) \quad (18)$$

II.6.5. Transmisión de calor a través del agua: A través de la fase líquida sólo se transmite calor sensible a causa de la diferencia de temperaturas entre la interfase y el seno del agua; por tanto:

$$\bar{M}_L C_L dT = h_L a_H S_{dl} (T - t_i) \quad (19)$$

en la que h_L es el coeficiente individual de transmisión de calor a través de la fase líquida.

II.7.

Utilización de las ecuaciones fundamentales.

Las cinco ecuaciones diferenciales fundamentales descritas en (1), (8), (14) y (19), son aplicables a todos los procesos de interacción aire-agua que tienen lugar adiabáticamente, una vez alcanzado el régimen estacionario. Mediante las dos primeras ecuaciones, es decir los balances de materia

(1) y calor (8) del proceso, se deducen, debidamente integradas para abarcar toda la columna, las relaciones estequiométricas entre los caudales másicos del aire y del agua procesados, las variaciones de humedad del aire y las de entalpía entre ambas fases.

Las tres ecuaciones cinéticas (14), (18) y (19), permiten el cálculo de las dimensiones activas a la interacción aire-agua de los aparatos -altura de relleno l para la sección S considerada- integradas entre los límites respectivos:

$$l = \frac{1}{k'a_M} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x_i - x} = \frac{1}{h_C a_H} \cdot \frac{M_G S}{S} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t_i - t} =$$

$$= \frac{1}{h_L a_H} \cdot \frac{M_L C_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T - t_i} \quad (20)$$

Pero para poder llevar a cabo el cálculo e integración de las ecuaciones cinéticas es necesario: a) disponer de

información sobre el valor de los coeficientes individuales que en ellas figuran, y b) establecer la relación biunívoca entre las condiciones del aire (humedad y temperatura) o del agua (su temperatura) en cualquier sección transversal horizontal del relleno, y las condiciones correspondientes a la superficie interfacial (x_i y t_i) en la misma sección.

Salvo en el caso de procesos de enfriamiento adiabático del agua en que ésta prácticamente alcanza la temperatura húmeda que tiene el aire a la entrada del relleno, la relación entre las condiciones del aire, del agua y de la interfase no puede establecerse sin tanteos múltiples y tediosos; y como las condiciones de enfriamiento adiabático del agua no son representativas de los procesos industriales de enfriamiento de agua, la solución de las ecuaciones cinéticas debe simplificarse adecuadamente.

Actualmente el sistema más ampliamente seguido para calcular y diseñar torres de enfriamiento de agua, se basa en el uso de una ecuación cinética única que, mediante la introducción de hipótesis simplificadoras fundadas en la analogía entre los fenómenos de transmisión de calor y transferencia de materia que tienen lugar conjuntamente en el proceso de interacción aire-agua de las torres de enfriamiento, suministra datos suficientemente exactos a efectos prácticos para su cálculo. Es el Método simplificado del Potencial Entálpico idea-

do por Merkel y desarrollado por Lichtenstein.

II.8.

Método simplificado del Potencial Entálpico.

Partiendo de la ecuación(18) representativa del calor total transmitido, Merkel utilizó la relación encontrada por Lewis para el caso agua-aire entre el coeficiente de transmisión de calor, h_C y el de transferencia de materia k' , para sustituir el valor de h_C por su valor aproximado deducido de dicha relación:

$$h_C / k' s \simeq 1 \quad (21)$$

o sea

$$h_C \simeq k' s$$

y supuso iguales las superficies de interacción aire-agua útiles a la transferencia de materia y a la transmisión de calor,

$$a_M \simeq a_H \simeq a \quad (22)$$

que puede admitirse en la práctica cuando todo el relleno se encuentra totalmente mojado y no quedan partes secas de él.

El caudal de mojado mínimo necesario para que esta hipótesis se cumpla, es en general bastante inferior a los caudales normales de trabajo utilizados en las torres de enfriamiento de agua. Teniendo en cuenta estas hipótesis, la ecuación (18) queda de la forma siguiente:

$$M_G di_G = k' a S dl [(s_i t_i + r_{Ox_i}) - (s t + r_{Ox})] \quad (23)$$

pero recordando que $i_G = s t + r_{Ox}$ y admitiendo que el calor específico del aire húmedo no varía apreciablemente a efectos prácticos entre el que tiene en la interfase y el que tiene en el seno del aire, es decir, suponiendo que $s \simeq s_i$ (24), la ecuación anterior se convierte en:

$$M_G di_G = k' a S dl (i_{G_i} - i_G) \quad (25)$$

y recordando la ecuación (8) del balance entálpico,

$M_G di_G = \bar{M}_L C_L dT$, resulta asimismo

$$\bar{M}_L C_L dT = k' a S dl (i_{G_i} - i_G) \quad (26)$$

Las dos ecuaciones anteriores pueden integrarse para abarcar toda la columna, y sirven con toda generalidad para calcular las dimensiones de los aparatos donde se desarrollan procesos de interacción aire-agua utilizando como fuerza impulsora única el "potencial entálpico". Las ecuaciones (25) y (26) integradas abarcando toda la torre quedan como sigue:

$$k' a = \frac{V}{M_G} = \int_{i_{G_1}}^{i_{G_2}} \frac{di_G}{i_{G_i} - i_G} \quad (27)$$

y

$$k' a = \frac{V}{\bar{M}_L} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{G_i} - i_G} \quad (28)$$

donde

$$V = S.l \quad (29)$$

es el volumen total del relleno. La altura de relleno necesaria vendrá correspondientemente representada por

$$l = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G_1}}^{i_{G_2}} \frac{di}{i_{G_i} - i_G} \quad (30)$$

y

$$l = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{G_i} - i_G} \quad (31)$$

o bien, introduciendo el término de "Unidades de Transporte",

$$l = (H_G) (N_G) \quad (32)$$

$$l = (H_L) (N_L) \quad (33)$$

donde H_G y H_L son por definición las "Alturas de las Unidades de Transporte":

$$H_G = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{M_G}{S} \quad (34)$$

y

$$H_L = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \quad (35)$$

y los términos integrales son los "Números de Unidades de Transporte": respectivamente

$$N_G = \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} \quad (36)$$

y

$$N_L = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{Gi} - i_G} \quad (37)$$

Para poder efectuar las integraciones necesarias y calcular los Números de Unidades de Transporte, es preciso conocer, en cualquier sección horizontal de la columna, la relación entre la entalpía de la masa de aire, i_G y la correspondiente al gas saturado a la temperatura a que se encuentra la interfase aire-agua en la misma sección, representada por

i_{G_i} . Esta relación se deduce de las ecuaciones (19) y (26)

$$\bar{M}_L C_L dT = h_L a_H S dl (T - t_i) \quad (19)$$

$$\bar{M}_L C_L dT = k' a S dl (i_{G_i} - i_G) \quad (26)$$

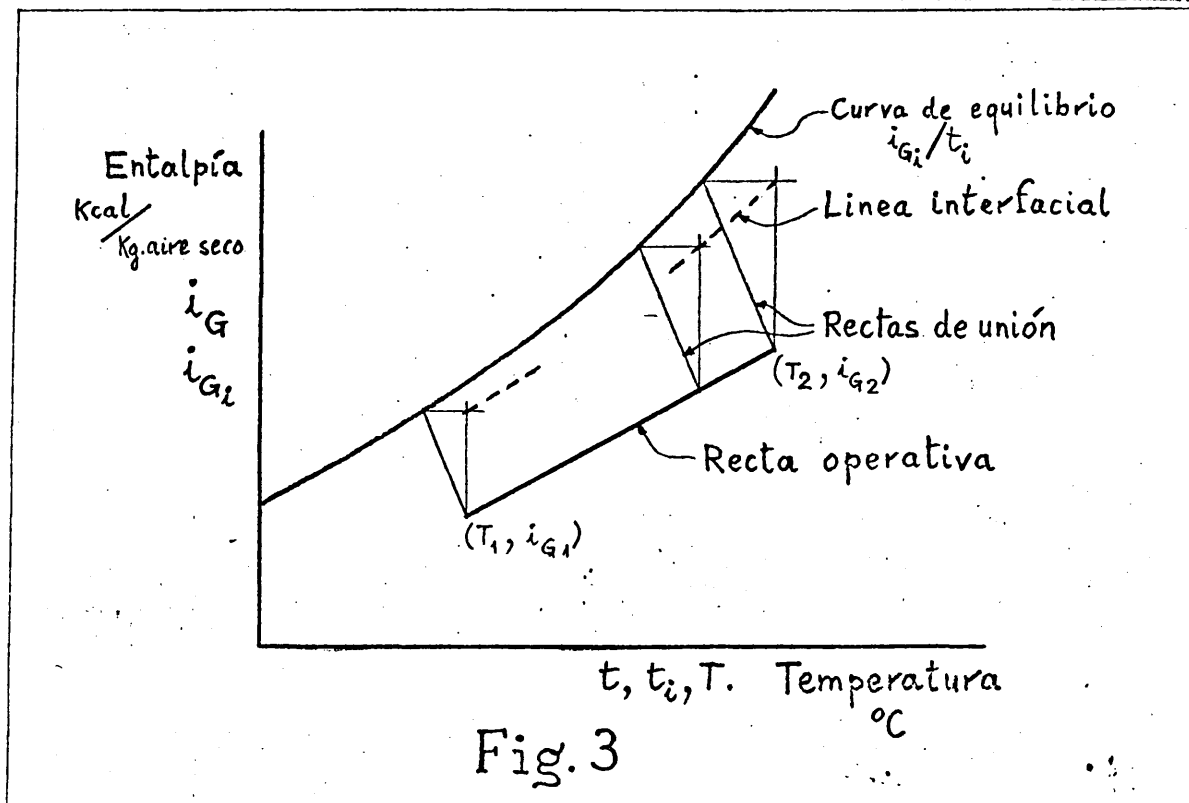
es decir,

$$h_L a_H (T - t_i) = k' a (i_{G_i} - i_G) \quad (38)$$

o bien teniendo en cuenta la ecuación (22),

$$\frac{i_{G_i} - i_G}{t_i - T} = \frac{h_L}{k'} \quad (39)$$

relación que permite conocer la temperatura y entalpía de la interfase utilizando un método gráfico, en el diagrama entalpía/Temperatura (Figura 3), a partir de la temperatura del líquido T y la entalpía de la masa de aire i_G , en cualquier sección horizontal de la columna, si se conoce la relación de los coeficientes de transporte h_L . a y k' . a . En dicho diagrama entalpía/temperatura se representan la curva de equilibrio



El proceso de interacción aire-agua en el diagrama entalpía-temperatura.

i_{G_i}/t_i y la recta operativa, y mediante la relación (39) se obtienen los puntos de la línea interfacial. La pendiente de las "Rectas de Unión" que conectan los puntos de la recta operativa con los de la curva representativa de las condiciones de la interfase es precisamente la relación de los coeficientes

$$- \frac{h_L}{k'} .$$

La integración final de las ecuaciones (36) y (37) puede realizarse bien sea gráficamente o bien por integración numérica, representando los valores de $1/(i_{G_i} - i_G)$ frente a los de i_G ó los de T , con lo que se obtienen los Números de Unidades de Transporte, N_G ó N_T .

Para el cálculo de la Altura de las Unidades de Transporte H_G y H_L , ecuaciones (35) y (36), se necesita conocer, además de las velocidades másicas de aire o agua y la sección de la torre, el coeficiente $k'.a$, o coeficiente individual volumétrico de transferencia de materia a través de la fase gaseosa.

Comprobamos así que el conocimiento de los coeficientes de transporte k' y h_L resulta indispensable en el cálculo de los rellenos utilizados en las torres de enfriamiento de agua, no sólo para poder trazar las "Rectas de Unión" en el

diagrama entálpico, que permiten evaluar los Números de Unidades de Transporte, sino también para el cálculo de la Altura de esas Unidades de Transporte.

No abundan en la bibliografía, sin embargo, los datos sobre dichos coeficientes de transporte debido principalmente a las dificultades experimentales para conseguirlos. Estas dificultades están relacionadas con la gran exactitud con que hay que medir las fuerzas impulsoras, $x_i - x$ y $t_i - t$, de humedad y temperatura respectivamente, en la parte superior de las torres de enfriamiento de agua donde, debido a la proximidad del aire a la saturación son, de hecho, muy pequeñas y por tanto difíciles de evaluar, con lo que la exactitud de los coeficientes de transporte obtenidos está afectada de error proporcional a la imprecisión de esas medidas.

En la práctica se utilizan los llamados Coeficientes Globales de Transporte definidos por las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{k' \cdot a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{G1} - i_G} =$$

$$= \frac{1}{K' \cdot a} \cdot \frac{M}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{GT} - i_G} = 1 \quad (40)$$

$$\frac{1}{k' \cdot a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{Gi} - i_G} =$$

$$= \frac{1}{K' \cdot a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{GT} - i_G} = 1 \quad (41)$$

Esto lleva asociado el empleo de una fuerza impulsora global, diferencia entre la entalpía del gas saturado a la temperatura de la masa del agua (no de su interfase) y la entalpía del seno del aire, es decir:

$$M_G di_G = k' a S dl (i_{Gi} - i_G) = K' a S dl (i_{GT} - i_G) \quad (42)$$

De hecho esta igualdad sólo sería exacta si se cumplieran dos condiciones:

a) que la resistencia de la fase líquida a la transmisión de calor fuese prácticamente nula, es decir, que el coeficiente h_L fuera muy grande comparado con k' , y entonces la interfase se encontraría prácticamente a la temperatura de la masa de agua;

b) que la curva de equilibrio fuese una recta.

Pero como ninguna de estas dos suposiciones son exactas el uso de los Coeficientes Globales y la fuerza impulsora entálpica global no puede extenderse, sin error apreciable, al cálculo de elementos de relleno cuando las condiciones de trabajo sean muy diferentes de las que existían durante la determinación experimental de dichos Coeficientes Globales.

El método de Mickley (2) descrito más adelante permite no solamente determinar los coeficientes individuales de transporte mediante los datos conseguidos en un solo experimento, sino que, además, da información adicional sobre las condiciones del agua, del aire y de la interfase en cualquier sección transversal horizontal del relleno, con lo que el diseño de la torre es más científico y por tanto más exacto que si se utiliza el Método Simplificado del Potencial En-

tápico con un Coeficiente Global de Transporte.

Hasta Mickley, la determinación experimental de los coeficientes individuales de transporte se efectuaba realizando con el mismo relleno e iguales caudales de aire y agua dos experimentos de interacción aire-agua; uno de los experimentos era de humidificación adiabática con circulación del agua a temperatura constante, y el otro era de refrigeración del agua y por tanto a temperatura variable. A partir de los datos del primer experimento se calculaban los coeficientes volumétricos de transferencia de materia, $k'.a$ y de transmisión de calor h_{ga} a través de la fase gaseosa, utilizando para ello las ecuaciones (14) y (15) fáciles de integrar en este caso debido a la constancia de x_1 y t_1 respectivamente a lo largo de toda la columna. Suponiendo que los dos coeficientes así obtenidos permanecían válidos en el experimento de enfriamiento de agua, los datos obtenidos en el segundo experimento servía para calcular el coeficiente de transporte h_{La} , mediante tanteos de la razón

$-\frac{h_L}{k'}$, pendiente de las "Rectas de Unión", hasta que se

cumplía la ecuación (30)

$$1 = \frac{1}{k'.a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{G1} - i_G}$$

en que el valor de la integral es función biunívoca del valor tanteado de la pendiente de las rectas de unión.

II.9.

El Método de Mickley.

El método ideado por Mickley (2) para la determinación de los coeficientes individuales de transporte sólo exige la realización de un experimento de interacción aire-agua, con enfriamiento del agua o humidificación del aire, a condición de que el aire no alcance la saturación en ningún punto de la columna.

Este método se basa en una importante ecuación deducida por Mickley al sustituir en la ecuación (15) del calor sensible transmitido desde la interfase al aire el valor de h_G , por el derivado de la relación de Lewis, $h_G \approx k' \cdot s$:

$$M_G s \cdot dt = h_G a_H S \, dl \, (t_i - t) = k' \cdot s a_H S \, dl \, (t_i - t) \quad (43)$$

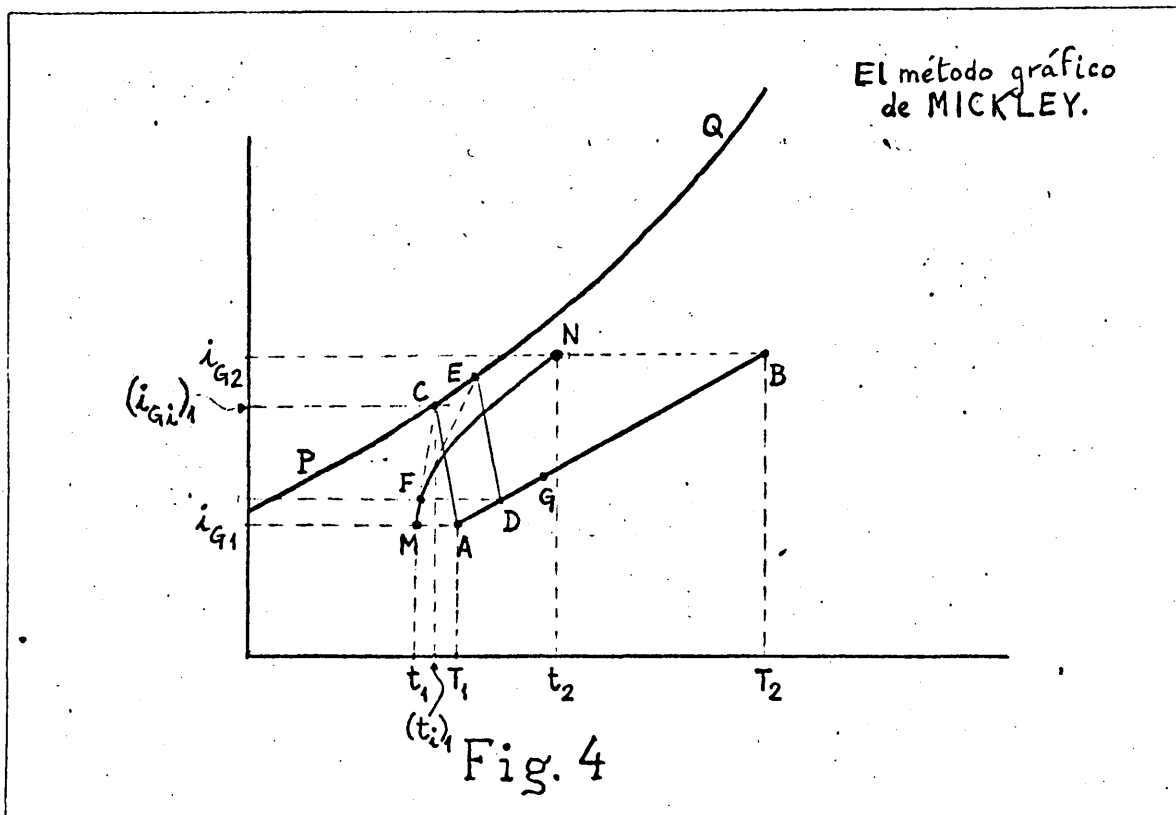
o sea:

$$M_G \, dt = k' \, a \, S \, dl \, (t_i - t) \quad (44)$$

Recordando la ecuación (25) $M_G di_G = k' a S dl (i_{G_i} - i_G)$,
dividiendo miembro a miembro las ecuaciones (25) y (44) y
suponiendo de nuevo iguales las áreas de relleno útiles a
la transferencia de materia y a la transmisión de calor,
ecuación (22), resulta finalmente la ecuación de Mickley

$$\frac{di_G}{dt} = \frac{i_{G_i} - i_G}{t_i - t} \quad (45)$$

que relaciona la entalpía y la temperatura de la corriente



gaseosa a lo largo de un proceso adiabático de interacción aire-agua en contracorriente.

En la Figura 4 están representadas las condiciones operativas de un experimento de enfriamiento evaporativo de agua en el diagrama Entalpía/Temperatura. PQ es la curva de equilibrio, AB la recta operativa, AC y DE son dos "Rectas de Unión"; el punto M representa las condiciones del aire a la entrada de la columna.

Para calcular las condiciones del aire en una sección horizontal de la columna, Mickley se basa en el hecho de que la pendiente de la recta MC es, de acuerdo con la ecuación (45)

$$\frac{(i_{G_i} - i_G)_1}{(t_i - t)} = \left(\frac{di_G}{dt} \right)_1 \quad \left(-\frac{i_G}{t} \right)_1 \quad (46)$$

representando el punto C las condiciones del aire saturado en contacto con la interfase aire-agua en la base de la columna (subíndice 1); aceptando que dicha pendiente se mantiene y no varía en un intervalo suficientemente pequeño, que corresponde a un incremento de altura de la columna, el punto F representará la entalpía y la temperatura del aire a esa pequeña

distancia de la base de la columna, a la que corresponderán las condiciones del punto D en la recta operativa y del punto E en la curva de equilibrio, enlazados por la correspondiente Recta de Unión DE.

Repetiendo el razonamiento anterior desde el punto F, la pendiente de la recta FE podrá considerarse que se mantiene en un sucesivo incremento de altura del relleno, y ésta construcción gráfica, repetida progresivamente, permite el trazado de la curva MN que representa las condiciones del aire a lo largo de toda la columna, siendo el punto N el que representa las condiciones del aire a la salida de la misma.

Con los datos obtenidos en un experimento de enfriamiento evaporativo de agua en condiciones estacionarias en una columna debidamente aislada, quedan fijadas la recta operativa AB y los puntos M y N. Suponiendo un cierto valor de la razón $-h_L/k'$, pendiente de las "Rectas de Unión", (que se admite permanece fija y válida para toda la columna), la ecuación de Mickley puede ser integrada por el procedimiento gráfico explicado, empezando por la base, y solamente si el valor de $-h_L/k'$ supuesto era el acertado, habrá coincidencia entre la temperatura del aire a la salida de la columna y la encontrada gráficamente (punto N de la figura 4).

El método de Mickley permite integrar el Número de Unidades de Transferencia entálpica N_G al conocer por medio del tanteo gráfico las sucesivas líneas de unión, lo que a su vez permite calcular el valor de $k'a$, pues también se conocen l y M_G/S en la ecuación (30).

Conocido el valor de $k'a$ podrá hallarse el de h_{La} mediante la razón $-h_L/k'$ encontrada en el tanteo gráfico. Y finalmente la relación de Lewis permite calcular también el coeficiente h_{Ga} tomando un valor medio del calor específico del aire, s , a lo largo de toda la columna.

II.10.

Revisión bibliográfica.

El diseño de torres industriales de enfriamiento de agua utilizando Coeficientes Globales de Transporte obtenidos experimentalmente para el relleno a emplear en condiciones de operación próximas a las de trabajo previstas, es el más comúnmente recomendado y utilizado por la industria (4). Sin embargo la hipótesis simplificadora que supone su empleo es considerar nula la resistencia de la fase líquida a la transmisión de calor lo que puede originar errores sustanciales si las condiciones reales de operación son notablemente diferentes de las bases empleadas en el cálculo.

El método entálpico de Merkel-Mickley (2) supone un avance en las posibilidades de diseño científico de las torres de enfriamiento de agua pues, a la vez que permite obtener los coeficientes individuales de transporte, tanto para la fase líquida como para el aire, mediante experimentos simples de enfriamiento de agua, da información adicional sobre las condiciones de operación a lo largo del equipo de proceso. Como condiciones particulares para poder aplicar este método deducen que a) el aire no debe alcanzar la saturación en ningún punto del equipo y b) toda la superficie útil del relleno debe encontrarse mojada para que sean iguales las áreas activas a la transferencia de materia y a la transmisión de calor. Entre los estudios experimentales recientemente realizados y descritos en la bibliografía se puede encontrar confirmación práctica de estas dos condiciones en las torres industriales de enfriamiento de agua.

Godishmik (12) ha estudiado buscando el óptimo económico, el efecto de la velocidad del aire y la relación agua/aire como variables principales condicionantes del coste inicial y gastos anuales de operación de las torres industriales de enfriamiento para determinados grados de aproximación de la temperatura del agua a la temperatura húmeda del aire. Deduce que la velocidad óptima del aire oscila entre 1.3 y 2.0 m/sec. para las torres de tiro mecánico; para diferencias de temperatura de 10°C y temperatura húmeda del aire de

21°C deduce que la relación aire-agua óptima se encuentra entre 1.5 y 2.5, saliendo el aire de la torre con humedades relativas entre el 85 y el 95 %. El hecho de que a menudo se alcance la saturación del aire a la salida de las torres de enfriamiento se explica fácilmente por los cambios necesarios en las condiciones de operación y en las condiciones del aire.

Dicho estudio prueba que las críticas a la aplicabilidad del método de Mickley por razón de la necesidad de que el aire no alcance la saturación en la parte superior de las torres, no son siempre justificadas al poder ser comparables en ciertas condiciones las de funcionamiento de torres a escala piloto con las torres industriales.

Campbell (13) desarrolló una técnica para medir el porcentaje de la superficie total de relleno efectivamente mojada en torres de enfriamiento de agua, demostrando que para caudales de agua superiores a 700 lb/hr.ft^2 (3.400 Kg/h.m^2) más del 80 % del relleno ensayado se encuentra mojado. Este límite, por debajo del cual el porcentaje de área mojada desciende rápidamente, depende de la densidad y disposición del relleno.

El método de Mickley para obtención de coeficientes individuales de transporte en torres de enfriamiento de agua fué utilizado por primera vez por Thomas y Houston (14) uti-

zando una columna de sección cuadrada de 0,30 x 0,30 metros rellena con rejas dentadas de madera, y estudiando la influencia sobre los tres coeficientes individuales de los caudales de aire y agua como variables importantes del proceso, y la altura de relleno para poder calcular los efectos finales. No estudiaron la influencia de las otras posibles variables (temperatura del agua y condiciones del aire). Encontraron las siguientes expresiones para los coeficientes individuales de transporte del relleno ensayado

$$k_{Ga} = C.G^{0.72}. L^{0.26} \quad (\pm 7 \% \text{ error})$$

$$h_{Ga} = C'. s . k_{Ga} \quad "$$

$$h_{La} = C''. G^{1.00}. L^{0.51}$$

Masiá (15), realizó varias series de experimentos de enfriamiento de agua utilizando una columna de esferas/cilindros que presentaba una superficie de contacto definida entre las dos fases, igual para la transferencia de materia que para la transmisión de calor, y que no presentaba efectos finales. Mediante el método de Mickley obtuvo las siguientes ecuaciones para los tres coeficientes individuales de transporte en función de las distintas variables del proceso, estudiando la influencia sobre los coeficientes no sólo de los caudales de aire y agua sino también de la temperatura del agua, la temperatura del aire y su humedad. A continuación

Masiá desarrolló una investigación similar con una torre piloto de enfriamiento de agua de 0,43 x 0,43 metros de sección y relleno de rejillas de madera compuestas de travesaños dentados de sección rectangular de 5 x 1 cm. y 2,5 cm. de altura de los dientes, para comprobar, una vez corregidos los efectos finales por el método de extrapolación de los resultados conseguidos con varias alturas de relleno, que la columna de laboratorio de cilindros/esferas era eficaz para reproducir los mecanismos de proceso en las torres de enfriamiento grandes ya que había concordancia y proporcionalidad entre las expresiones de los coeficientes individuales de enfriamiento encontradas para la torre piloto en función de los caudales de aire y agua, con los previamente encontrados para la columna de esferas/cilindros. Suponiendo por tanto que la influencia de las demás variables sería también igual, dió las siguientes expresiones para los tres coeficientes individuales de transporte del relleno industrial empleado:

$$k'a = C.G^{0.82}.L^{0.12}.e^{(0.05 t_m - 37 x_m)}$$

$$h_{c'a} = C'.G^{0.82}.L^{0.12}.e^{(0.05 t_m - 37 x_m)}$$

$$h_{L'a} = C''.G^{1.80}.L^{1.00}.e^{(53 x_m - 0.09 T_m)}$$

TABLA I - Resumen bibliográfico de las diferentes expresiones encontradas para los coeficientes individuales de transporte en procesos de interacción aire-agua.

$$\text{Coef.} = C \cdot G^n \cdot L^m \cdot f(j)$$

Coef.	AUTOR					
	Johnstone y Singh (16)	Mc. Adams y otros. (17)	Yoshida y Tanaka (18)	Cribb (19)	Thomas y Houston (14)	Masiá (15)
$k' \cdot a$	n		1.0	1.5	0.72	0.82
	m		0.2	-	0.26	0.12
	$f(j)$		-	-	-	$f(t, x)$
$h_G \cdot a$	n	0.95	1.0		0.72	0.82
	m	-	0.07		0.26	0.12
	$f(j)$	-	$f(t_{\text{superf}})$		-	$f(t, x)$
$h_L \cdot a$	n		0.7	-	1.00	1.8
	m		0.5	1.5	0.51	1.0
	$f(j)$		-	-	-	$f(x, T)$
Tipo de relleno	A. Ras-chig 1"	A. Ras-chig 1"	A. Ras-chig	Anillos 4"	Rejas madera	Esferas-cilindros y rejillas madera.

Como resumen de los valores de los coeficientes individuales de transporte encontrados experimentalmente por diversos autores, damos en la Tabla I una visión comparativa de los resultados de Johnstone y Singh (16), Mac Adams y colaboradores (17), Yoshida y Tanaka (18) y Cribb (19), con los resultados de Thomas y Hounston (14) y Masiá (15) obtenidos por el método de Mickley. En dicha tabla se indica el tipo de relleno ensayado y los valores propuestos para los tres coeficientes individuales, expresados en la forma general: $\text{coef.} = C.G^n.L^m.f(j)$, donde C es una constante para el relleno en cuestión; G es la velocidad másica del aire en Kg/h.m^2 de aire seco; L la velocidad másica del agua; n y m son parámetros; y f(j) indica que la expresión viene influida por otras variables, j, además de G y L.

II.11.

Alcance de la presente investigación.

El objetivo inmediato y de alcance de la presente investigación, se centró en el estudio completo de un relleno industrial típico en torres de enfriamiento de agua para establecer un procedimiento sistemático que permitiera la obtención de los coeficientes volumétricos individuales de transferencia de materia y transmisión de calor de éste y otros rellenos industriales representativos en función de las variables de proceso que sobre ellos influyen: condiciones operativas del agua: caudal y temperatura; y condiciones del aire: caudal,

humedad y temperatura.

El relleno ensayado sería del tipo de película con vistas a poder extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones en las que este mismo relleno funcionara como relleno de goteo y poder estudiar la distribución de efectos debidos a la película mojante y a las gotas dispersas cayendo de un elemento al siguiente.

Para ello debería montarse todo el equipo experimental de una torre piloto de enfriamiento de agua, y construirse los tipos más representativos de elementos de relleno de forma prismática (listones) en cantidad suficiente, así como los marcos necesarios para permitir disponerlos según las múltiples formas prácticas posibles. Asimismo debería prepararse un programa completo de cálculo en lenguaje FORTRAN que permitiera obtener por medio de un ordenador electrónico los coeficientes individuales de transporte para el relleno ensayado a partir de los datos experimentales de ensayos simples según el método entálpico de Merkel-Mickley.

La posibilidad de aplicación de ordenadores electrónicos digitales a la resolución de cálculos laboriosos, principalmente aquellos en que intervienen cálculos por aproximaciones sucesivas, sugería la idea de aplicar el ordenador IBM-1620 existente en el Instituto de Electricidad y Automá-

tica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid, dirigido por el Profesor J. Santesmases, al planteamiento y resolución de los tanteos múltiples que requiere la construcción gráfica de Mickley.

Se intentaría así completar y continuar en la línea seguida por Thomas y Houston (14) y Masía (15) para, utilizando las herramientas modernas de cálculo que representan los ordenadores electrónicos, estudiar de forma exhaustiva un tipo de relleno industrial en una torre piloto de enfriamiento de agua, analizando el grado de exactitud inherente al empleo de aparatos a escala piloto en los resultados de los coeficientes obtenidos.

III - A P A R A T O

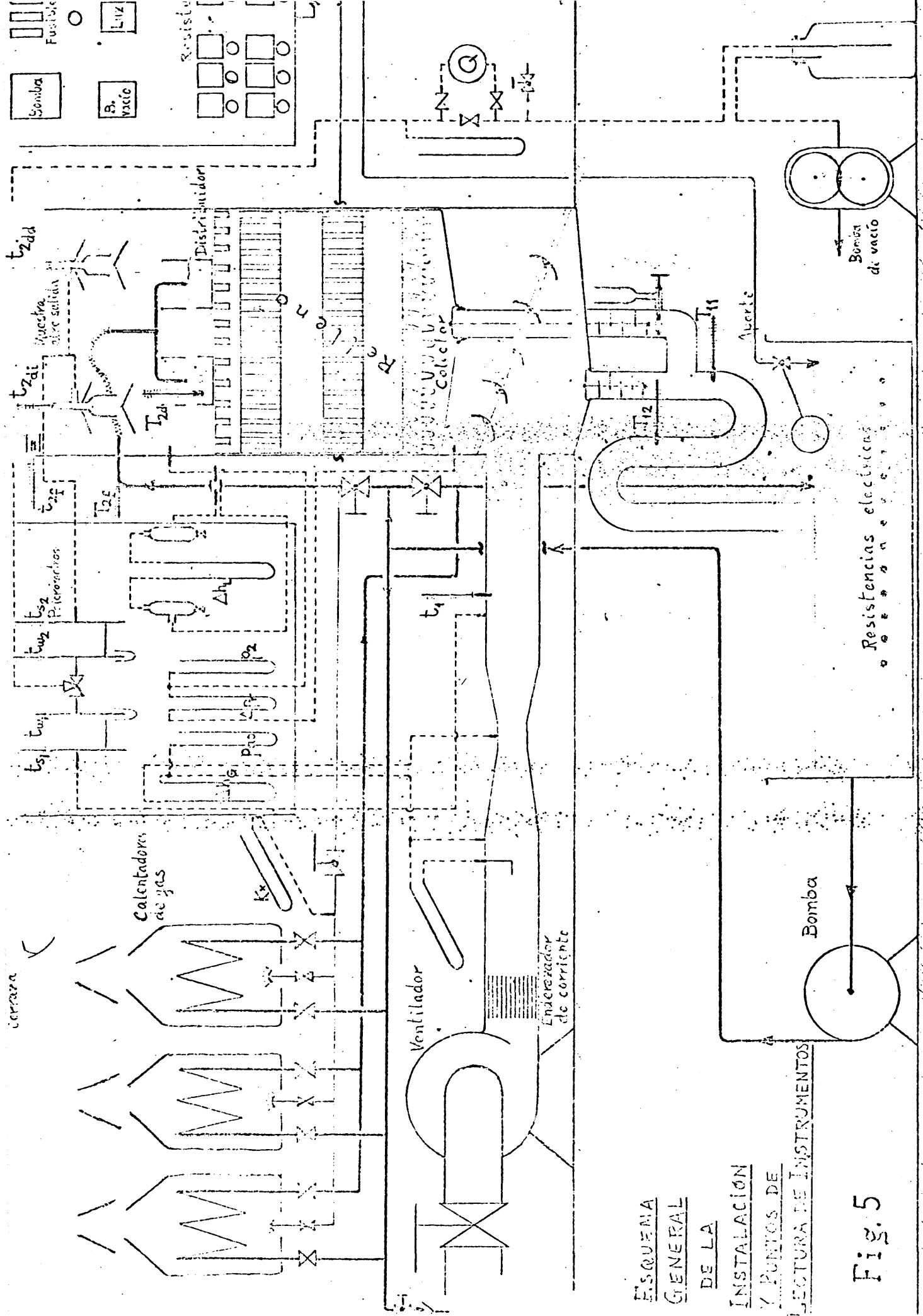
=====

III - A P A R A T O =====

III.1. Situación y disposición general.

El equipo experimental se montó (ver Fig. 5) en una terraza cubierta y ventilada de unas dimensiones aproximadas de 6,5 x 5,0 m., que tenía una plataforma de unos 2 metros de ancho y 6,5 m. de largo, elevada sobre el nivel del suelo unos 0,70 m.

Bajo esta plataforma se dispuso el depósito de agua de recirculación con un sistema de calefacción eléctrica, el grupo motobomba de circulación y la bomba de vacío para aspiración de muestras de aire por los psicrómetros. Sobre la plataforma y encima del depósito de agua mencionado se construyó el cuerpo principal de la torre de enfriamiento de forma que el agua caída en el fondo de la torre descendiera directamente al depósito de recirculación a través de una tubería



con sifón.

III.2.

Torre de enfriamiento.

La torre de enfriamiento se situó en uno de los extremos de la plataforma elevada. El cuerpo de la torre se construyó de obra de albañilería, con dos ventanas, una fija y otra practicable, con junta de caucho y dos cierres para observación y acceso a su interior. La torre se construyó de sección cuadrada con unas dimensiones de 69,5 x 69,5 centímetros (con lo que su sección libre resultaba ser de 0,483 m²), y una altura útil de 2 metros. Interior y exteriormente se impermeabilizó con varias capas de pintura asfáltica. El interior de la torre se dejó de color negro pero el exterior se pintó de blanco para favorecer el adiabatismo.

El aire entraba a la torre por la parte inferior de uno de sus lados verticales y salía por la parte alta después de atravesar el relleno. La parte superior estaba rematada por una sección troncopiramidal y una tapa elevada para evitar la entrada de agua de lluvia durante los experimentos. El interior de la torre tenía los soportes necesarios para sostener horizontalmente el relleno y permitir el drenaje independiente del dispositivo colector especial y del agua que caía al fondo de la torre, así como dispositivos para dispo-

ner los elementos de relleno distanciados unos de otros si se deseaba.

III.3.

Sistema de circulación forzada de aire.

En el extremo de la plataforma opuesto a la torre y procurando disponer del mayor tramo recto posible para la conducción de aire se dispuso el ventilador principal movido por un motor de 3 CV a 1.500 rpm, para impulsión de aire al fondo de la torre de enfriamiento: el aire se tomaba así de un punto bien alejado de la salida de la torre para evitar la recirculación del aire húmedo y aspirar aire libre, con humedad y temperatura constantes. El caudal de aire a la torre se regulaba a la aspiración del ventilador mediante una válvula de mariposa de paso graduable a voluntad. A la salida del ventilador el aire pasaba primero a través de un enderezador de corriente antes de atravesar el venturímetro de medida y entrar en la torre por la base lateral. La conducción de aire tenía un diámetro interior de 300 mm. En la parte inferior de la torre un dispositivo de placas deflectoras orientaba el aire verticalmente hacia el relleno. Una vez atravesado éste el aire salía de la torre por su parte superior.

III.4.

Sistema de circulación y calentamiento del agua.

El sistema de circulación del agua estaba constituido por un gran depósito metálico capaz para 400 litros de agua, situado debajo de la plataforma elevada en que estaba instalada la torre a fin de recoger el agua que descendía de aquélla una vez atravesado el relleno. El depósito se protegió de posibles desbordamientos por un conducto de rebose con desagüe al exterior de la terraza. Una bomba centrífuga movida por un motor eléctrico capaz de impulsar 4 l/seg. a una altura de 10 m.C.A., impulsaba el agua a la parte alta de la torre a través de una tubería de 1½" provista de un diafragma para medir el caudal introducido en la torre. El resto del agua impulsada era devuelta al depósito directamente o a través del circuito de calentamiento, con lo que se conseguía una homogenización de la temperatura del agua en el mismo. El agua que entraba en la torre se distribuía uniformemente por el relleno mediante un sistema distribuidor (Fig. 6) de dos canales grandes superpuestos a siete canales menores, resbalaba por el relleno y se recogía en la parte inferior del mismo mediante un sistema colector original.

ESQUEMA DEL DISTRIBUIDOR

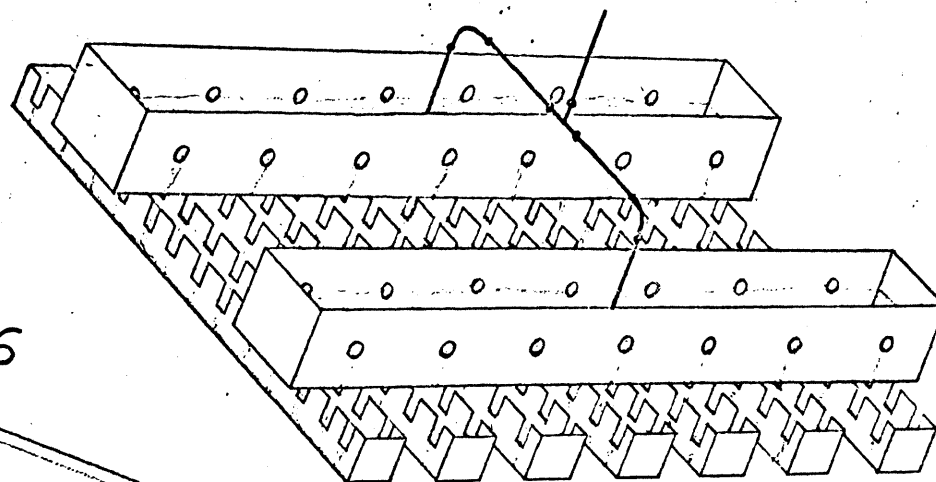
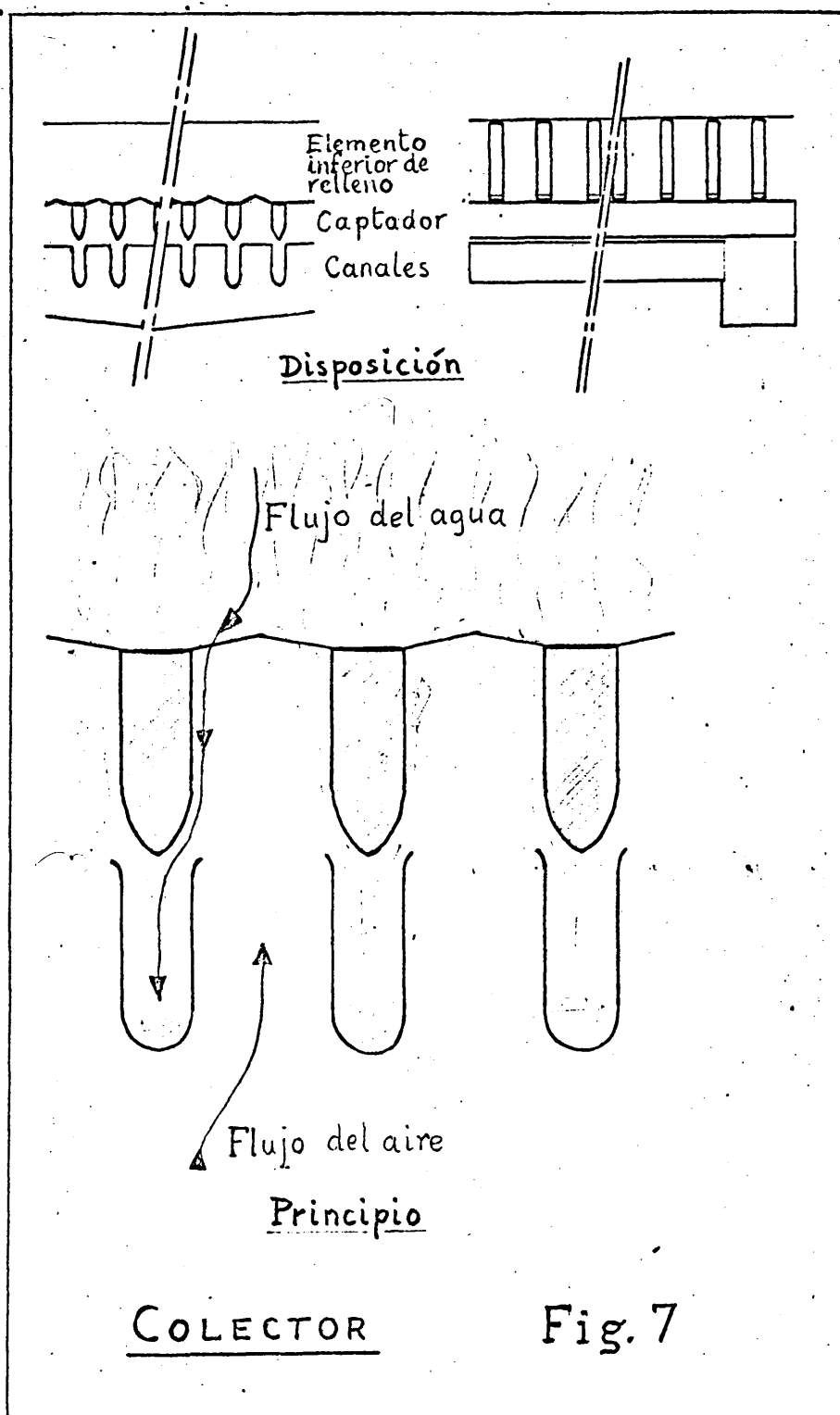


Fig. 6



El sistema colector se diseñó para recoger el agua descendente del relleno inmediatamente debajo del elemento inferior, evitando que cayera directamente desde ese punto al fondo de la torre y se pusiera en contacto con el aire de entrada. (Este fenómeno se ha procurado evitar en todo lo posible pues es el origen más importante de "efectos finales" o secundarios de enfriamiento no debidos al relleno en sí, sino al goteo del agua hasta el fondo de la torre desde la parte inferior del relleno, que pone en contacto el agua con el aire de entrada, frío y seco; este aire es el que produce proporcionalmente un mayor enfriamiento).

Un primer sistema colector ensayado, estaba basado en un conjunto de amplios canales paralelos en los que debería recogerse el agua descendente del relleno guiada por un sistema de dobles vertientes paralelas colocado inmediatamente encima de los espacios libres entre los canales. Este sistema no era efectivo y producía una gran pulverización del agua al obligar a entrecruzarse aire y agua.

El sistema colector empleado finalmente recogía la mayor parte del agua que abandonaba el relleno y la devolvía por un conducto vertical cerrado al depósito inferior; la fracción del agua no retenida en el colector caía al fondo de la torre donde existía también una bajante de comunicación con el depósito inferior.

Estas dos bajantes tenían un sistema de sifón y una serie de placas deflectoras dentro del mismo que impedían, por un lado el que el aire que se introducía en la torre por la parte inferior saliera junto con el agua por las bajantes del desagüe de la torre, y por otro evitaban que hubiera arrastre de aire por el agua al caer ésta sobre el nivel de líquido en el sifón, pudiendo falsear las lecturas termométricas del agua. El sifón iba provisto de un nivel visible y una válvula de mariposa para controlar el nivel del agua en el mismo.

El caudal de agua a la torre se regulaba y ajustaba a voluntad mediante una válvula de asiento instalada en la conducción de alimentación a la torre.

El sistema de calentamiento del agua circulante consistía en un conjunto de 12 resistencias eléctricas de 1.500 watios cada una, capaces de dar 12.000 Kcal/h en total, dispuestas en el depósito inferior, y en una instalación auxiliar de calentamiento continuo formada por tres calentadores de agua en serie con una potencia calorífica individual de 15.000 Kcal/h por calentador para una presión de gas de 80 mm.C.A., con mecheros de combustión de gas de ciudad provistos de llama piloto y corte por baja presión de gas o de agua. Un circuito de agua, procedente de una desviación de la impulsión de la bomba de recirculación alimentaba los tres ca-

lentadores a gas capaces de suministrar hasta 30.000 Kcal/h entre los tres.

El gas combustible para alimentación de los tres calentadores se suministraba a través de una conducción en la que se instaló una llave de regulación de macho cónico provista de un mango muy alargado a fin de regular a voluntad y mantener constante durante los experimentos el caudal de gas combustible y por tanto la cantidad de calor suministrado al agua. La constancia del caudal de gas se aseguraba manteniendo constante la presión del gas combustible a la entrada de los quemadores, que se medía con un manómetro de tubo en U de ramas muy inclinadas. La presión de la red principal de gas se medía también con otro manómetro a la entrada de la instalación. La constancia de la presión fué suficiente para obtener una regulación manual adecuada durante los experimentos corrigiendo manualmente las pequeñas fluctuaciones momentáneas.

En un punto del circuito auxiliar de calentamiento se instaló un grifo de drenaje para purgar continuamente el sistema y evitar la concentración de sales y óxido en el agua de recirculación. El drenaje se regulaba manualmente y descargaba en el sistema abierto de drenaje de pluviales procedente de la parte superior de una terraza adyacente.

Para reponer continuamente el agua purgada y las pérdidas debidas a evaporación y arrastre por el aire se instaló una conducción de agua procedente de la red general, alcanzando el depósito inferior a través de una llave reguladora de flotador que mantenía un nivel constante en el depósito durante el funcionamiento de la instalación.

III.5.

Instrumentos de medida. (Ver Fig. 5).

El caudal de aire se medía por medio de un venturímetro intercalado en la conducción recta horizontal entre el ventilador y la base de la torre. Este venturímetro se diseñó y calculó de acuerdo con normas básicas pero debido al poco espacio recto de tubería disponible hubo de instalarse un enderezador de corriente inmediatamente a la salida del ventilador y calibrarse el conjunto por el sistema de medidas transversales de presión diferencial con tubo de Pitot y manómetro diferencial contra las medidas del manómetro diferencial del venturímetro, Δh_g .

El caudal de agua alimentado a la torre se medía mediante un diafragma calibrado y contrastado experimentalmente, instalado en la tubería vertical de alimentación a la torre y un manómetro diferencial de mercurio, Δh_L , conectado a las dos tomas del diafragma a través de sendas cámaras de calma que retenían las suciedades de óxido, etc.

La temperatura del agua a la entrada de la torre se medía con dos termómetros situados uno en la conducción de entrada al distribuidor, T_{2f} , y otro en el primer sistema de canales superpuestos del distribuidor T_{2d} . La temperatura del agua a la salida de la torre se medía en dos puntos distintos del sistema de bajantes y sifón del fondo de la torre, debajo de la plataforma, con sendos termómetros, T_{11} y T_{12} .

La temperatura del aire a la entrada de la torre t_1 , se medía inmediatamente antes de su entrada en la base de la misma; leyéndose fácilmente por el observador de los psicrómetros al ir provisto de lente fija de aproximación. La temperatura del aire a la salida de la torre se medía en los dispositivos (Fig. 8) para toma de muestra del aire a la salida del relleno, t_{2di} y t_{2dd} . Los termómetros que estaban situados dentro de la torre se observaban a través del cristal de la puerta de acceso al relleno, el más alejado a través de una lente de aumento montada en el interior de la torre frente al termómetro correspondiente.

La humedad del aire tanto a la entrada como a la salida de la torre se medía con psicrómetros originales (Fig. 9), contruídos de acuerdo con las normas del "Cooling Tower Institute, C.T.I." para mediciones continuas. Un sistema original de toma de muestras y aspiración continua mediante una bomba de vacío permitía asegurar muestras continuas

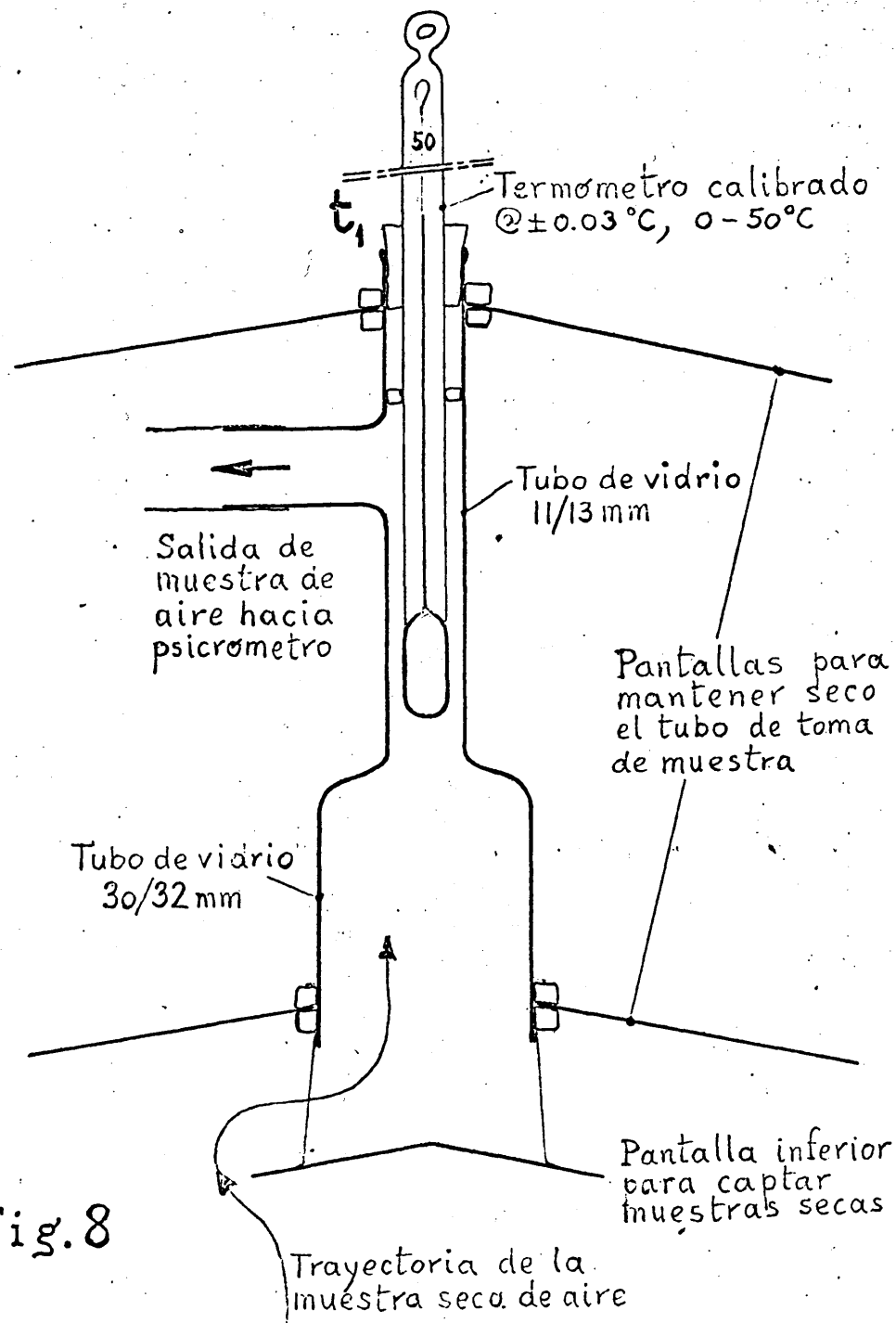
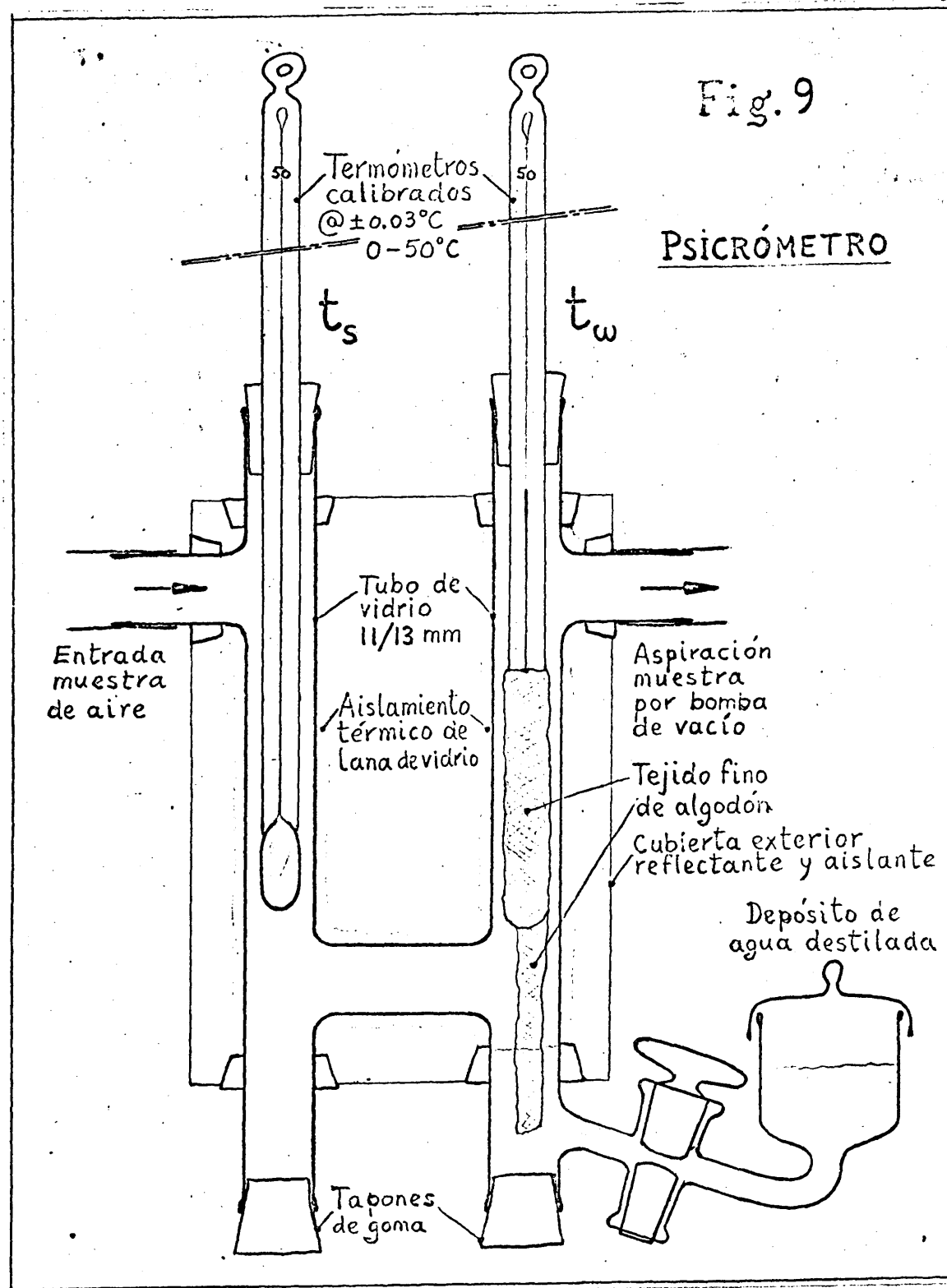


Fig. 8

TOMA DE MUESTRA Y TEMPERATURA DEL AIRE
A LA SALIDA DE LA TORRE



representativas y de caudal constante para los psicrómetros. La humedad del aire a la entrada se medía tomando una muestra inmediatamente antes de su entrada en la torre; esta muestra pasaba por uno de los psicrómetros y daba los valores de t_{s1} y t_{w1} . El aire a la salida de la torre se muestreaba en dos puntos separados situados encima del distribuidor de agua, mediante los dispositivos especiales (Fig. 8), que también servían para situar en ellos los termómetros de medida de la temperatura del aire a la salida del relleno y que permitían extraer muestras de aire exentas de gotas de agua arrastrada. Estas muestras de aire se unían y pasaban por el psicrómetro del aire de salida obteniéndose los valores de t_{s2} y t_{w2} .

Todas las temperaturas se medían con termómetros de bulbo de mercurio, calibrados y contrastados, que daban una precisión mejor de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$, con escala de -5 á 50°C .

Los manómetros para medida de los caudales de aire y agua así como de presiones antes del venturímetro, antes del relleno y después del mismo, y los dos psicrómetros se instalaron en un tablero de control situado en una de las paredes de la torre de enfriamiento.

III.6.

Instalación eléctrica y otros accesorios.

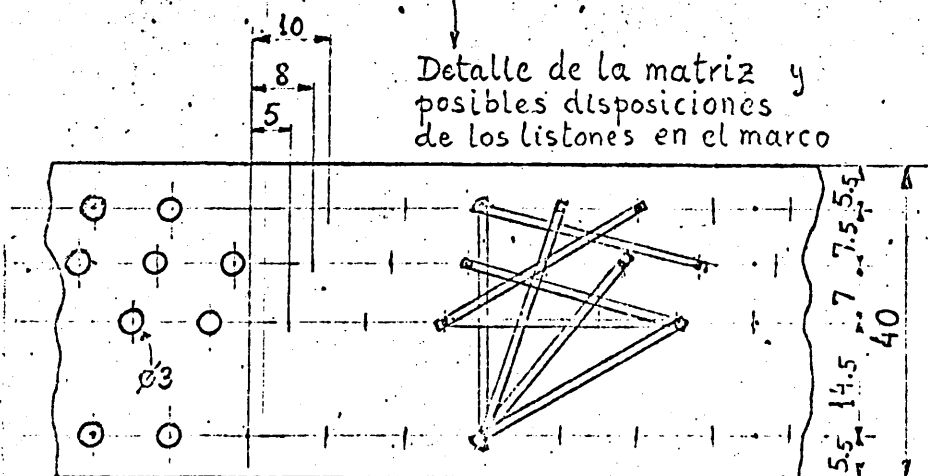
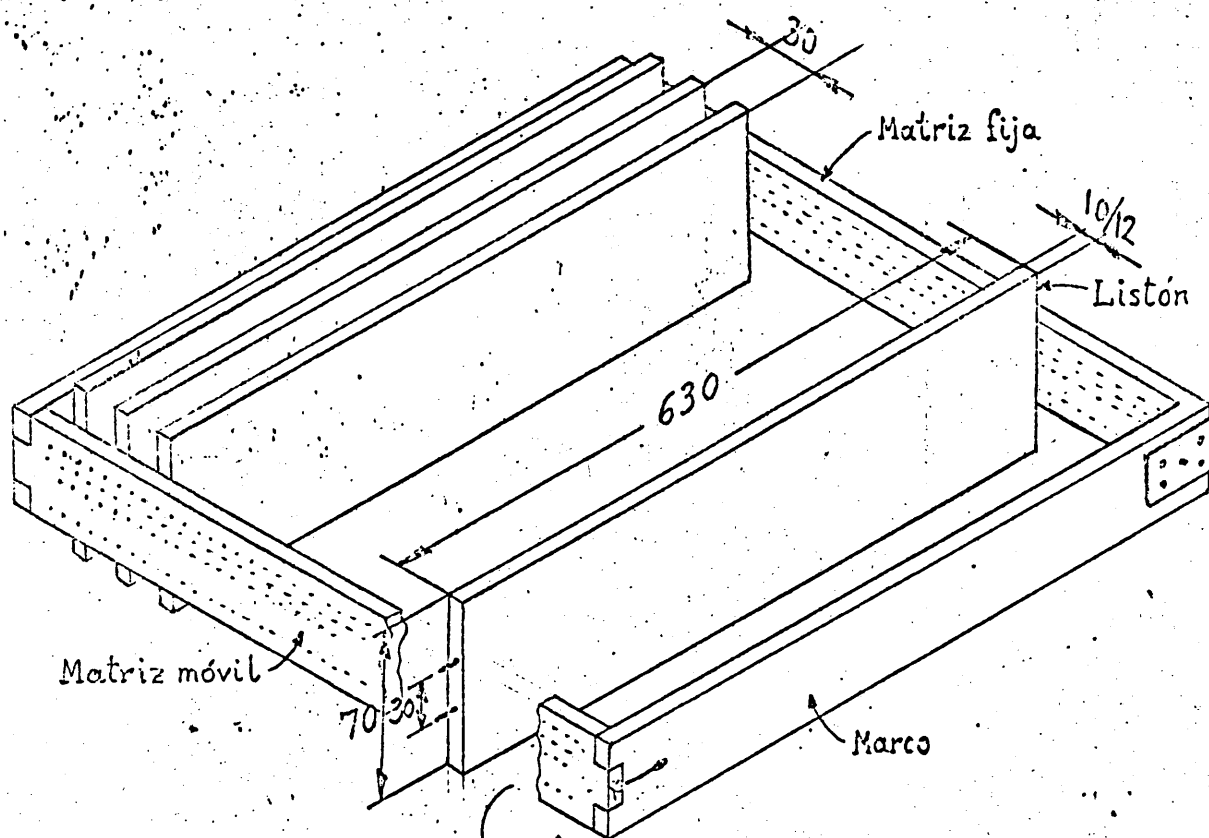
Se montó una instalación eléctrica para servicio del ventilador principal, de la bomba de recirculación de agua, de la bomba de vacío para toma continua de muestras de aire, del ventilador de extracción de aire y gases de combustión de la terraza, de las resistencias eléctricas y del sistema de iluminación del conjunto experimental. Interruptores, fusibles y pilotos se dispusieron en un cuadro de material aislante, colocado junto a la torre y protegido por una cubierta transparente.

La terraza en que se instaló el conjunto experimental fué cubierta para proteger de la intemperie los diferentes equipos instalados. El aire se renovaba tomándolo del exterior; el escape superior de la torre sobresalía de la cubierta. Un ventilador de extracción se instaló inmediatamente después de cubrir la terraza para extraer los gases de combustión de los calentadores y sobre todo para aspirar aire del exterior y mantener durante los experimentos en el interior de la terraza un ambiente con temperatura igual a la exterior.

III.7.

Descripción del relleno ensayado.

Se construyeron varios tipos representativos de listones para formar diferentes elementos de relleno (Fig.1) dis-



ELEMENTO DE RELLENO

Fig. 10

puestos en marcos apropiados. El tipo finalmente utilizado en este trabajo experimental se describe en la Figura 10 y está formado por listones de sección rectangular de 70 x 10/12 mm. y 630 mm. de largo, dispuestos paralelamente al flujo del aire y distanciados 30 mm. entre sus planos verticales de simetría, con lo que el espacio libre dejado al paso del aire entre cada dos listones era de 18/19 mm., el volumen específico ocupado por el relleno era de $0.34 \text{ m}^3/\text{m}^3$. y la superficie específica útil expuesta al intercambio de calor y materia era de $70 \text{ m}^2/\text{m}^3$. aproximadamente.

Cada elemento de relleno estaba constituido por 20 listones dispuestos paralelamente en cada marco como muestra la Figura 10. La Figura 10 muestra el diseño de los marcos para permitir diversas disposiciones de listones en cada elemento de relleno. Los elementos de relleno se dispusieron superpuestos unos sobre otros en direcciones cruzadas alternativamente, como muestra la Figura 5. El elemento inferior descansaba sobre el dispositivo colector y sobre el superior descansaba el distribuidor, asegurándose durante el montaje del relleno la horizontalidad del colector, relleno y distribuidor para evitar la posibilidad de desviaciones en el flujo del agua descendente e impedir la formación de canales preferentes de flujo.

Los marcos soporte para los listones permitían disponer éstos con separaciones múltiplos de 10 mm. y en 6 posiciones distintas respecto a la vertical entre 0 y 90°. Los soportes interiores de la torre permitían disponer los elementos del relleno superpuestos o distanciados unos de otros por múltiplos de 5 cm.

IV. - P R O C E D I M I E N T O
=====

IV - P R O C E D I M I E N T O

=====

El procedimiento seguido en la obtención de los datos experimentales necesarios para el cálculo de los coeficientes individuales de transporte correspondientes al tipo de relleno ensayado y las condiciones de trabajo elegidas en cada caso, mediante el aparato experimental descrito en la sección anterior, se detalla a continuación.

IV-1.

Preparación del aparato e instrumentos de medida.

En primer lugar se disponía e instalaba convenientemente dentro de la torre el dispositivo colector y el relleno a ensayar, consistente en un número determinado de elementos de relleno superpuestos, y dispuestos inmediatamente encima del dispositivo colector. Era muy importante comprobar la posición y contacto del elemento inferior de relleno con el dispositivo colector de agua para asegurar su buen funcio-

namiento operativo. También se comprobaba rutinariamente la horizontalidad de todos y cada uno de los elementos de relleno así como el buen contacto de cada uno con los adyacentes, superior e inferior con objeto de tener una distribución uniforme del agua por toda la superficie activa del relleno, evitar caminos preferentes al paso de agua y zonas en las que una mala distribución del agua pudiera ocasionar su pulverización por el paso del aire, ya que el relleno seleccionado para hacer los ensayos era del tipo de película.

Inmediatamente encima del elemento superior de relleno se colocaba el dispositivo distribuidor de agua, procurando que a lo largo de todas las aristas inferiores de los canales hubiera un contacto uniforme con el elemento superior de relleno, lo que se conseguía por medio de unas pletinas de aluminio adosadas a los canales de distribución.

A continuación se colocaba y fijaba sobre el distribuidor el tramo en T de tubería de alimentación mediante un soporte transversal, de forma que el agua de alimentación a la torre entrara, sin posibilidad de pulverización, en los dos canales primarios del distribuidor.

Al soporte transversal del tramo móvil de tubería de alimentación se fijaban convenientemente los dispositivos de toma de muestra y temperatura del aire de salida, que se

instalaban por duplicado, alimentando un único colector de muestra de aire de salida, a fin de obtener muestras de aire representativas. En cada dispositivo de toma de muestra mencionado se instalaba un termómetro para medir la temperatura del aire inmediatamente a la salida del relleno. Además, se instalaban convenientemente las lentes de aproximación que permitían leer las temperaturas marcadas por cada termómetro a través de la ventana de la torre.

La muestra de aire de entrada se tomaba en el conducto inmediatamente antes de la entrada a la torre, y su temperatura se medía mediante un termómetro cuyo bulbo estaba introducido unos 5 cm. en la corriente de aire de entrada justo antes de penetrar en la torre por su base.

La temperatura del agua a la entrada del relleno se medía en dos puntos para poder evitar la posible influencia de su colocación: un termómetro estaba introducido 5 cm. en la tubería de entrada de agua a la torre en la parte superior de la misma y el otro estaba sumergido en uno de los dos canales primarios del distribuidor, cerca del punto de entrada de agua al mismo. Este termómetro podía observarse desde el exterior a través del cristal de la ventana de acceso a la torre.

Otros dos termómetros, introducidos dentro del sistema de sifón en las bajantes de recogida de agua a la salida de la torre medían la temperatura del agua a la salida: la temperatura medida era intermedia entre las que tienen las dos porciones de agua, recogidas por el colector y por el fondo de la torre, pero era tanto más parecida a la que representaba la que tendría el agua a la salida de la torre si en ella no hubiera efectos finales, cuanto mejor funcionaba el colector, es decir cuanto menor era la cantidad de agua que éste dejaba pasar al fondo de la torre. (Si se midiera individualmente la temperatura de ambas corrientes por separado no conociéndose sus respectivos caudales, no podría cuadrarse convenientemente el balance térmico o de materia de la torre).

Una vez instalados los termómetros de medida de temperaturas de agua y aire a la entrada y salida de la torre en la forma indicada, se preparaban los psicrómetros para medida de la humedad del aire antes y después de pasar por la torre, de la forma siguiente: los termómetros que medían la temperatura seca del aire se disponían de forma que su bulbo y unos 5 cm. de vástago estuvieran dentro de la corriente de aire de muestra. El bulbo y unos centímetros de vástago de los termómetros que medían la temperatura húmeda del aire se cubrían totalmente con una vuelta de tela fina de algodón cuidando sobre todo de cubrir totalmente las partes cilíndrica e inferior

del bulbo. La parte inferior del pábilo se debaja extendida de forma que su borde inferior quedara sumergido en la rama llena de agua del psicrómetro y pudiera, por capilaridad, mantener siempre húmeda la tela que rodea el bulbo del termómetro. La tela se mantiene en posición rodeándola con unas vueltas de hilo de algodón. El diámetro de la parte cilíndrica cubierta de tela de ambos termómetros húmedos se procuró que fuera idéntico en los dos psicrómetros, de forma que la sección libre de paso de aire por ellos y por tanto su velocidad fuera igual en ambos al encontrar el aire en los dos psicrómetros la misma sección y resistencia de paso entre termómetro húmedo y pared del psicrómetro y poder repartir por igual en los dos el aire aspirado por el sistema de vacío. Esta sección libre de paso se midió (ver fig. 9) exactamente para calcular el caudal de aire a aspirar por los conductos de toma de muestra mediante la bomba de vacío. Este caudal total de aire aspirado que era proporcional al vacío existente en un punto del sistema entre la bomba de vacío y los psicrómetros, se aseguraba habiéndolo medido previamente con un contador de gas intercalado en serie en la línea de aspiración a los psicrómetros, con cuya medida se podía fijar, de acuerdo con el caudal de aire aspirado que se deseaba, el vacío necesario en el punto de control. La regulación del caudal de aire aspirado, siendo la bomba de vacío de desplazamiento positivo y velocidad constante, se realizaba abriendo más o menos una válvula de asiento cónico que co-

municaba directamente al aire el sistema de vacío: al permitir más aire entrar en este punto, se aspiraba menos aire por el sistema de vacío a los psicrómetros. El caudal de aire aspirado por los psicrómetros se establecía sistemáticamente para conseguir una velocidad de paso del aire por los termómetros húmedos fija e igual a 5,0 m/seg. con cualquiera de los juegos de termómetros que se emplearon.

Una vez puesto en marcha la bomba de vacío y fijada esa velocidad crítica de paso del aire, se completaba el nivel de agua destilada en las ramas de los psicrómetros para que los pábilo estuvieran siempre mojados por capilaridad durante las lecturas y tomas de datos.

IV-2.

Puesta en marcha de la instalación.

Puestos a punto los manómetros, psicrómetros y termómetros para las diferentes medidas, se ponía en marcha el ventilador principal, asegurándose de que aspiraba aire del exterior. Para conservar el aire del recinto en condiciones lo más parecidas al exterior, se ponía en marcha el extractor de la parte alta de la terraza, con lo que se renovaba continuamente con aire del exterior el del recinto donde estaba instalado el aparato experimental, y se sacaban fuera también los gases de combustión procedentes de los calentadores de agua. El caudal de aire se regulaba manualmente a voluntad

para cada experimento al valor deseado, mediante la válvula de mariposa en la aspiración del ventilador.

Para poner en marcha el sistema de agua de alimentación a la torre se comprobaba primero el nivel de agua en el depósito debajo de la torre y se mantenía automáticamente durante los experimentos por el sistema de llave con flotador, para reponer las pérdidas continuas por purga, evaporación y arrastre.

A continuación se ponía en marcha la bomba de agua de recirculación, y se comenzaba a calentar el agua del depósito hasta la temperatura deseada, lo más cercana posible a la futura de equilibrio de entrada a la torre. Para ello se ponía en servicio el número de calentadores a gas que se juzgaba necesario según la cantidad de calor a suministrar al agua, y se alimentaban éstos con gas combustible cuya presión se regulaba y mantenía a voluntad en el valor fijo apropiado durante el experimento.

El sistema de recirculación de agua, una vez establecido, se purgaba continuamente dejando salir al colector de pluviales, con una válvula de asiento, un pequeño caudal continuo de agua fijado a voluntad al valor que la experiencia demostró suficiente para una purga suficiente y un buen control de la continuidad de esa purga.

Resultó aconsejable, para acortar en lo posible el tiempo necesario en alcanzar un régimen estacionario de equilibrio en el sistema, recircular activamente agua por la torre, mojando el relleno hasta que éste estuviera totalmente empapado, sobre todo después de períodos de inactividad en que la madera habría perdido parte del agua que tiene normalmente absorbida cuando la torre está funcionando.

Cerrando parcialmente el circuito "corto" de recirculación para regular bien el caudal de alimentación de agua a la torre, se fijaba dicho caudal en cada caso al valor deseado y se mantenía en funcionamiento todo el conjunto durante el tiempo que fuera necesario hasta que se alcanzaran unas condiciones de funcionamiento estables.

El tiempo necesario para esto podía oscilar entre varias horas, si la torre había estado inactiva con anterioridad, y media hora si las condiciones del experimento a realizar variaban poco de las que tenía el sistema durante el experimento anterior.

IV-3.

Comprobaciones periódicas y toma de datos experimentales.

En todos los casos para establecer el régimen estacionario en el sistema, se comprobaba sistemáticamente la constancia de los caudales de aire y agua por la torre, la temperatura y humedad del aire a la entrada (únicas variables del proceso sobre las que no se podía influir a voluntad) y la presión del gas a los calentadores, y se observaba la tendencia a subir o bajar de la temperatura del agua de entrada en la torre hasta que ésta se mantenía constante. Alcanzado el régimen estacionario para una temperatura y humedad del aire a la entrada dadas, la temperatura del agua de alimentación a la torre se estabilizaba, y con ella todas las demás variables: temperatura de salida del agua y temperatura y humedad del aire a la salida. Durante todo el experimento y las lecturas sucesivas que se realizaban, era importante comprobar la constancia de la presión de gas combustible (calor suministrado al sistema), la temperatura y humedad del aire a la entrada, y los caudales de aire y agua.

Periódicamente se comprobaba también y rellenaba si era necesario el nivel de agua destilada en los psicrómetros y su normal funcionamiento; también se comprobaba y ajustaba el valor del caudal de aire aspirado para mantener constante la velocidad de paso del aire por los termómetros húmedos igual a 5 m/seg.

Para cada experimento la toma de datos se realizaba, una vez alcanzado el régimen estacionario en el sistema, de la forma más rápida posible y por dos personas: una de ellas, fija, comprobaba (y corregía si era necesario) la presión de gas combustible (para que ésta se mantuviera constante), la temperatura y la humedad del aire a la entrada. Al mismo tiempo podía ir escribiendo los demás datos que le iba suministrando el otro observador: temperatura del agua a la entrada y a la salida; temperatura de salida del aire, caudal de aire y caudal de agua; otros datos como la temperatura ambiente, la presión atmosférica se tomaban previamente para cada experimento o conjunto de experimentos.

De todos los experimentos se tomaban datos por tres lecturas consecutivas, realizadas con intervalos de 10 a 15 minutos. Si se apreciaba necesario se tomaban cuatro o más lecturas, pero si la constancia de la segunda respecto de la primera era notable, podía no realizarse la tercera lectura por resultar innecesaria.

Todos los datos experimentales se registraban en hojas impresas en las que se indicaban además las anotaciones que se juzgaba convenientes sobre el experimento realizado, día y hora en que se tomaron los datos y personas que los tomaron.

La secuencia de toma de datos era la siguiente:

Datos y lecturas previos

Fecha y número de orden del experimento: anotar.

Número y hora de la lectura: anotar.

Iniciales de observadores: anotar.

Tipo de relleno y tipo de ensayo: anotar.

Número de calentadores en servicio: anotar.

Presión atmosférica. leer y anotar.

Temperatura ambiente: leer y anotar.

Presión anteorificio del venturímetro: leer y anotar.

Pérdida de carga del aire a través del relleno: leer y
anotar.

Presión del aire a la salida del relleno: leer y anotar.

Datos experimentales a anotar

Por observador fijo:

t_1 : comprobar constancia y anotar.

t_{s1} : comprobar constancia y anotar.

t_{w1} : comprobar constancia y anotar.

Presión del gas a los calentadores: mantener constante.

t_{s2} : leer y anotar.

t_{w2} : leer y anotar.

T_{2f} : leer y anotar.

t_{2f} : leer y anotar.

Δh_L : comprobar constancia y anotar.

Δh_G : comprobar constancia y anotar.

Por observador móvil:

t_{2di} : leer y anotar.

t_{2dd} : leer y anotar.

T_{2d} : leer y anotar.

T_{11} : leer y anotar.

T_{12} : leer y anotar.

IV-4.

Procedimiento de cálculo.

El procedimiento de cálculo seguido para obtener los coeficientes individuales de relleno a partir de los datos experimentales comprende tres etapas: balance entálpico del experimento; obtención de los valores de la pendiente de las líneas de unión y de la integral entálpica a partir de los datos experimentales mediante el ordenador IBM-1620; y cálculo final de los coeficientes individuales a partir de los datos obtenidos en el ordenador. A continuación se detallan los pasos y operaciones necesarios de cada etapa, encontrándose en el Apéndice detallado el cálculo de un experimento completo.

Balance entálpico: Tiene por objeto comprobar que el experimento se ha realizado en buenas condiciones y los datos experimentales pueden tomarse como válidos. Como datos intermedios se obtienen al realizar el balance entálpico del experimento los de las entalpías y temperaturas de aire y agua a la entrada y salida de la torre necesarios para efectuar la construcción de Mickley en el diagrama entalpía/temperatura, que se realiza por el ordenador electrónico.

Los pasos y operaciones a realizar para efectuar el balance entálpico son los siguientes:

Corrección de temperaturas mediante los datos de calibrado de cada termómetro.

Selección de temperaturas medias representativas.

Conversión de las lecturas psicrométricas.

Cálculo de la presión media en el interior de la torre y de los psicrómetros.

Cálculo de la humedad corregida del aire a la entrada y salida de la torre a partir de los datos psicrométricos y de presiones.

Determinación del caudal de agua y del caudal de aire corregido.

Balance entálpico del agua y balance entálpico del aire.

Cálculo del error entálpico para decidir sobre la validez de los datos experimentales.

Proceso de los datos experimentales por el ordenador IBM-1620: Para resolver la construcción de Mickley a partir de los datos experimentales se parte de los datos siguientes:

Presión atmosférica media en el interior de la torre, π .

Temperatura del aire a la entrada de la torre, t_1 .

Entalpía del aire a la entrada de la torre, i_{G_1} .

Temperatura del agua a la salida de la torre, T_1 .

Temperatura del aire a la salida de la torre, t_2 .

Entalpía del aire a la salida de la torre, i_{G_2} .

Temperatura del agua a la entrada de la torre, T_2 .

Los pasos seguidos en el proceso de datos por el ordenador son:

Obtención por el ordenador de la función $i_{G_i} = f(t_i)\pi$ para la presión atmosférica media del interior de la torre.

Introducción en el ordenador de los datos de la entalpía y temperatura correspondientes a los cuatro puntos de la construcción de Mickley.

Proceso de los datos por el ordenador y cálculo de los valores de la "pendiente" y la "integral" correspondientes al intervalo de error admitido para t_1 .

Cálculo final de los coeficientes individuales:

El coeficiente $k'a$ se obtiene a partir de la ecuación

$$k'a = \frac{G}{1} \cdot \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} = \frac{G}{1} \quad [\text{Integral}] \quad (47)$$

El coeficiente $h_G a$ se calcula a partir de $k'a$ por la relación de Lewis:

$$h_G \cdot a = k' \cdot a \cdot s_m \quad (48)$$

El coeficiente $h_L a$ se calcula a partir de la "pendiente de las líneas de unión" y $k'a$:

$$h_L a = [\text{Pendiente}] \cdot k' \cdot a$$

V - RESULTADOS EXPERIMENTALES
=====

V - RESULTADOS EXPERIMENTALES

=====

V-1.

Planeamiento de los experimentos.

Se planearon cuatro serie de experimentos para estudiar la influencia de las diferentes variables de operación sobre los tres coeficientes individuales de transporte, distribuidas de la forma siguiente:

1. Influencia de los caudales de aire y agua. Se planearon $9 \times 5 = 45$ experimentos, estudiando 9 niveles del caudal de aire y 5 niveles del caudal de agua.

2. Influencia de las condiciones del aire. Se planearon 16 experimentos estudiando la influencia de las condiciones del aire -Temperatura, humedad y entalpía- a 2 niveles del caudal de aire (y 2 niveles del caudal de agua).

3. Influencia de la temperatura del agua. Se planearon 16 experimentos estudiando la influencia de la temperatura del agua, a 2 niveles del caudal de agua (y 2 niveles del caudal

de aire).

4. Estudio de los efectos finales. Se planearon 8 experimentos para estudiar los efectos finales a altura reducida de relleno, a 2 niveles del caudal de aire y 2 del caudal de agua.

V-2.

Realización de los experimentos.

Los resultados prácticos se obtuvieron en forma de coeficientes individuales volumétricos de transferencia de materia y transmisión de calor, que son los productos de los respectivos coeficientes individuales por el parámetro superficie interfacial por unidad de volumen, a.

El estudio del tipo de relleno ensayado comprendía por tanto el de la influencia sobre los tres coeficientes volumétricos individuales de las variables que prácticamente pueden afectarles: el caudal de aire (su velocidad másica); el caudal de agua (caudal de mojado); la temperatura del agua, las condiciones del aire (entalpía, temperatura y humedad), y la altura de relleno (efectos finales).

Las condiciones de operación estaban comprendidas dentro de las distintas gamas de utilización normal tanto de caudales como de temperaturas, estableciéndose los caudales de ensayo entre límites prácticos de acuerdo con 24 experi-

mentos sistemáticos representativos descritos por el C.T.I. con torres de enfriamiento de agua de tiro forzado y flujo vertical (4).

En todos los experimentos se comprobó por observación visual directa a través de las ventanas de la torre experimental, que el relleno se encontraba mojado en toda su superficie y no había zonas secas no útiles a la transferencia de materia, aceptándose que la superficie de contacto por unidad de volumen disponible para la transferencia de materia y la transmisión de calor eran coincidentes, hipótesis que es necesario realizar para poder generalizar el uso de los coeficientes volumétricos individuales $k'a$, h_{Ga} y h_{La} .

En principio se admitieron como "estadísticamente válidos" todos los puntos experimentales obtenidos con los datos de los ensayos en que el error del balance entálpico era inferior al $\pm 10\%$. Estos datos válidos sirvieron para obtener las ecuaciones representativas de los valores de los coeficientes volumétricos individuales en función de las variables principales que los afectan (caudales de aire y agua) y las secundarias (temperatura del agua y condiciones del aire).

Los efectos finales que siempre son apreciables en las torres industriales de enfriamiento de agua y parte integrante del efecto global de enfriamiento se eliminaron prác-

ticamente en la torre experimental, exceptuándose en las condiciones extremas de gran caudal de agua o aire. A efectos prácticos sin embargo los coeficientes volumétricos individuales se refirieron por sistema a la altura de relleno ensayada, sin corregirlos en función de los efectos finales que sólo eran apreciables en condiciones extremas, pocas veces utilizadas en la práctica.

Se realizaron en total 109 experimentos válidos, repartidos de la forma siguiente:

1. Influencia de los caudales de aire y agua.

65 experimentos: Números 1 al 65.

Niveles del caudal de aire: 3.400; 4.000; 4.400; 5.000; 5.500; 6.100; 6.600; 7.300 y 7.800 Kg/h.m². aproximadamente.

Niveles de caudal de agua: 3.000; 4.300; 6.100; 8.100 y 10.100 Kg/h.m². aproximadamente.

2. Influencia de las condiciones del aire.

22 experimentos: Números 67 al 85, 101, 102 y 103.

Intervalo de temperaturas medias del aire: 16 a 33°C.

Intervalo de humedades medias del aire: 0,009 a 0,014 Kg/Kg.AS.

Intervalo de entalpías medias del aire: 10 á 16
Kcal/Kg.AS.

3. Influencia de la temperatura del agua.

15 experimentos: Números 86 al 100.

Intervalo de temperaturas medias del agua: 20 á 37°C.

4. Estudio de los efectos finales.

7 experimentos: Números 104 á 110.

Alturas de relleno ensayadas: 35,4 cm. (normal) y
21,2 cm. (reducida).

Los resultados experimentales se presentan en las Tablas II á XV adjuntas en que figuran las principales variables de operación y los coeficientes individuales de transporte correspondientes a cada experimento con su intervalo de error si todos los puntos de la construcción de Mickley excepto t_1 fueran fijos y acumulando en t_1 el error sistemático: los coeficientes vienen dados entonces con un margen de error correspondiente a un error sistemático supuesto en t_1 cuyo valor estaba comprendido en el intervalo

$$t_1 - 0,05^{\circ}\text{C} < t_1 < t_1 + 0,05^{\circ}\text{C}$$

También se indican, para aquellos experimentos en que se realizó la construcción de Mickley y cálculo de la integral entálpica manualmente, los resultados obtenidos para la Pendiente y la Integral por ambos procedimientos de cálculo (Manual y por ordenador IBM-1620).

V-3.

Presentación de los resultados experimentales.

Los datos que se consignan en las tablas de resultados experimentales II á XV son los siguientes:

Datos experimentales transcritos en las Tablas

Núm. del dato	CONCEPTO	Inicial	Núm. del dato
1	Número del experimento	Nº	1
2	Fecha - número de orden en el día .	Fecha/orden	2
3	Lectura, hora	Lect.-hora	3
4	Presión atmosférica, mm. Hg	π	4
5	Temperatura ambiente, °C	$t_{amb.}$	5
6	Caudal de agua, Kg/h	M_L	6
7	Temperatura del agua a la entrada de la Torre, °C	T_2	7
8	Temperatura del agua a la salida de la Torre, °C	T_1	8

9	Salto térmico del agua, °C	$T_2 - T_1$	9
10	Salto entálpico del agua, Kcal/h.	ΔI_L	10
11	Caudal de aire seco, Kg. aire seco/hora	M_G	11
12	Temperatura seca del aire a la salida de la Torre, °C	t_{s_2}	12
13	Temperatura húmeda del aire a la salida de la Torre, °C	t_{w_2}	13
14	Temperatura del aire a la salida de la Torre, °C	t_2	14
15	Humedad absoluta del aire a la salida de la Torre, Kg/Kg.AS	x_2	15
16	Entalpía del aire a la salida de la Torre, Kcal/Kg.AS	i_{G_2}	16
17	Temperatura seca del aire a la entrada de la Torre, °C	t_{s_1}	17
18	Temperatura húmeda del aire a la entrada de la Torre, °C	t_{w_1}	18
19	Temperatura del aire a la entrada de la Torre, °C	t_1	19
20	Humedad absoluta del aire a la entrada de la Torre, Kg/Kg.AS ..	x_1	20
21	Entalpía del aire a la entrada de la Torre, Kcal/Kg.AS	i_{G_1}	21
22	Salto entálpico específico del aire, Kcal/Kg.AS	$i_{G_2} - i_{G_1}$	22
23	Salto entálpico del aire, Kcal/hora	ΔI_G	23
24	Error entálpico absoluto, Kcal/hora	$\Delta I_L - \Delta I_G$	24

25	Error entálpico relativo al agua, %	ϵI	25
26	Pendiente media de las líneas de unión, IBM(calc.)	Pendiente	26
27	Integral entálpica, IBM(calc.) ..	Integral	27
28	Velocidad másica del agua, Kg/h.m ²	L	28
29	Velocidad másica del aire seco, Kg/h.m ²	G	29
30	Temperatura media (aritmética) del agua, °C	\bar{T}	30
31	Temperatura media (aritmética) del aire, °C	\bar{t}	31
32	Humedad media (aritmética) del aire, °C	\bar{x}	32
33	Entalpía media (aritmética) del aire, Kcal/Kg.AS	\bar{i}_G	33
34	Coefficiente individual volumétrico de transferencia de materia en la fase gaseosa - Error sis- temático absoluto/relativo, % ..	$k'a$	34
35	Coefficiente individual volumétrico de transmisión de calor en la fase gaseosa - Error siste- mático absoluto/relativo, %	h_{Ga}	35
36	Coefficiente individual volumétrico de transmisión de calor en la fase líquida - Error sistemá- tico absoluto/relativo, %	h_{La}	36
37	Altura de relleno, m.	l	37

⋮

TABLA II - (Continuación)

... / ...

t_{s1}	17	33,00	30,75	25,40	25,55	25,35	28,15	30,40
t_{w1}	18	18,15	16,45	14,45	13,75	14,75	15,60	17,65
t_1	19	33,20	30,90	24,65	23,75	23,65	28,10	30,35
x_1	20	0,00800	0,00665	0,00660	0,00565	0,00695	0,00695	0,00835
i_{G1}	21	12,89	11,51	9,97	9,18	9,92	11,00	12,35
$i_{G2}-i_{G1}$	22	5,78	5,65	4,64	5,47	6,05	5,04	3,74
ΔI_G	23	9.400	10.800	9.900	13.200	16.600	14.900	11.900
$\Delta I_L - \Delta I_G$	24	0	+ 500	+ 100	+1.000	+1.300	+ 200	+ 800
ΣI	25	0	+ 5	+ 1	+ 8	+ 8	+ 1	+ 7
Pend.	26	1.40(1.52)	1,15(1,18)	1,05(1,17)	1,00(1,00)	1,12(1,20)	0,94(1,02)	0,83(0,90)
Int.	27	1,16(1,14)	1,24(1,18)	1,13(1,03)	1,12(1,09)	1,13(1,09)	1,11(1,05)	1,02(0,98)
I	28	2.900	3.000	3.100	2.850	3.050	3.050	2.900
G	29	3.380	3.980	4.430	5.020	5.680	6.110	6.580
T	30	29,9	28,8	26,1	27,6	28,8	28,9	28,0
T	31	31,0	28,8	23,9	23,5	23,9 ^e	26,8	28,2
\bar{x}	32	0,0136	0,0121	0,0107	0,0103	0,0118	0,0116	0,0122
\bar{i}_G	33	15,8	14,3	12,3	10,3	13,0	13,5	12,2

... / ...

TABLA II - (Continuación).

... / ...

k'a	34	11.000 ±100/1.8	14.000 ±170/2.4	14.100 ±230/3.1	15.900 ±250/3.1	18.100 ±330/3.6	19.100 ±200/2.1	19.000 ±200/2.1
n _G a	35	2.740 ±25/1.4	3.450 ±40/2.3	3.470 ±55/3.2	3.900 ±60/3.1	4.460 ±80/3.6	4.700 ±50/2.1	4.670 ±50/2.1
n _I a	36	15.600 ±500/6.4	16.100 ±550/6.8	14.800 ±700/9.4	15.900 ±750/9.4	20.300 ±1.150/11.4	17.800 ±600/6.7.	15.800 ±500/6.3
l	37	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354

TABLA III - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 8 al 15.

Nº. ...	8	9	10	11	12	13	14	15
Fecha/ orden ..	10/9/65-II	10/9/65-I	13/7/65-II	25/8/65-III	8/7/65-IV	21/9/65-V	7/7/65-II	7/7/65-II
Lect/ hora ...	1a-19.00	1a-13.00	2a-13.05	2a-21.35	3a-20.30	1a-21.30	1a-17.50	2a-20.05
π ...	706	706	705	709	707	710	704	704
$t_{amb.}$...	21,6	22,3	32,7	27,8	25,7	27,4	28,0	28,0
M_L	1.430	1.450	2.075	2.050	2.110	2.160	2.025	2.025
T_2	32,50	34,75	32,20	35,20	28,20	29,60	31,75	31,50
T_1	20,95	21,40	27,45	27,75	23,35	23,15	24,35	24,20
T_2-T_1	11,55	13,35	4,75	7,45	4,85	6,45	7,40	7,30
ΔIL	16.500	19.400	9.800	15.300	10.200	13.900	15.000	14.800
M_G	3.570	3.850	1.590	1.940	2.110	2.430	2.660	2.660
t_{s2}	20,65	20,15	30,70	27,80	24,90	25,80	27,20	26,80
t_{w2}	18,25	18,50	25,85	25,15	21,20	20,90	21,80	21,55
t_2	20,20	20,25	28,85	27,60	24,10	24,60	25,75	25,40
x_2	0,00530	0,01385	0,02090	0,02085	0,01565	0,01490	0,01560	0,01525
iG_2	12,85	13,28	19,73	19,36	15,34	14,92	15,69	15,40

... / ...

TABLA III - (Continuación)

... / ...

t_{s1}	17	21,90	22,35	31,95	27,90	26,00	27,45	29,10	28,65
t_{w1}	18	11,90	12,05	18,95	15,95	15,20	12,30	13,90	13,80
t_1	19	20,90	20,80	32,25	26,70	25,60	27,00	28,65	28,25
x_1	20	0,00530	0,00525	0,00955	0,00720	0,00715	0,00400	0,00453	0,00450
ig_1	21	8,25	8,20	13,62	10,84	10,54	8,94	9,68	9,57
$ig_2 - ig_1$	22	4,60	5,08	6,11	8,52	4,80	5,98	6,01	5,83
ΔI_G	23	16.400	19.500	9.700	16.500	10.100	14.500	16.000	15.500
$\Delta I_L - \Delta I_G$	24	- 100	+ 100	- 100	+ 1.200	- 100	+ 600	+ 1.000	+ 700
ΣI	25	- 1	+ 1	- 1	+ 8	- 1	+ 4	+ 7	+ 5
Pend.	26	0,51(0,61)	0,41(0,44)	1,78(1,80)	1,62(1,70)	1,55(1,64)	1,57(1,66)	1,35	1,26
Int.	27	1,30(1,29)	1,52(1,36)	1,25(1,24)	1,27(1,27)	1,12(1,17)	1,14(1,10)	1,07	1,08
L	28	2.960	3.000	4.300	4.250	4.375	4.475	4.190	4.190
G	29	7.380	7.970	3.290	4.020	4.375	5.030	5.510	5.510
T	30	26,7	28,1	29,8	31,2	25,8	26,4	28,0	27,9
\overline{T}	31	20,5	20,6	30,1	27,2 ^c	24,8	25,8	27,2	26,8
\overline{x}	32	0,0092	0,0096	0,0152	0,0140	0,0114	0,0095	0,0100	0,0099
\overline{ig}	33	10,5	10,7	15,2	15,1	12,9	11,9	12,6	12,5

... / ...

TABLA III - (Continuación)

... / ...

k'a 34	27.200 ±500/3.7	34.100 ±700/4.1	11.600 ±150/2.6	14.400 ±250/3.5	13.900 ±200/2.9	16.100 ±200/2.5	16.700 ±200/2.4	16.900 ±200/2.4
h _G a 35	6.670 ±130/3.9	8.350 ±150/3.6	2.880 ±35/2.4	3.560 ±60/3.4	3.420 ±50/2.9	3.950 ±45/2.3	4.100 ±50/2.4	4.140 ±50/2.4
h _I a 36	13.800 ±600/8.7	14.000 ±650/9.3	20.600 ±900/8.7	23.400 ±1.350/ 11.6	21.600 ±1.100/ 10.2	25.300 ±1.000/ 7.9	22.500 ±800/7.1	21.300 ±800/7.5
1 37	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354

TABLA IV - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 16 al 23.

Nº.	16	17	18	19	20	21	22	23
Fecha/ orden ..	7/7/65-II	13/8/65-I	5/7/65-II	26/7/65-II	9/9/65-II	13/7/65-I	16/9/65-III	8/7/65-III
Lect/ hora ...	3a-20.15	2a-17.20	1a-20.00	2a-13.40	1a-19.40	1a-11.40	3a-19.05	3a-19.45
π ...	704	706	708	711	705	706	710	707
$t_{amb.}$...	28,0	29,3	27,5	28,4	21,8	31,5	28,0	27,5
M_L	2.025	2.075	2.025	2.075	2.020	2.950	2.940	2.950
T_2	31,50	29,00	30,10	31,70	30,30	35,95	33,00	26,70
T_1	24,15	22,80	23,80	23,37	21,30	30,30	27,65	23,15
T_2-T_1	7,35	6,20	6,30	8,33	9,00	5,65	5,35	3,55
ΔI_L	14.900	13.100	12.800	17.300	18.200	16.700	15.700	10.400
M_G	2.670	2.900	3.175	3.510	3.840	1.650	1.910	2.085
t_{s2}	16,70	26,60	25,60	24,20	20,00	30,45	27,55	25,70
t_{w2}	21,40	20,60	21,40	20,55	18,40	27,35	25,25	20,95
t_2	25,35	24,85	24,55	23,15	19,90	30,15	27,50	24,60
x_2	0,01525	0,01395	0,01555	0,01485	0,01380	0,02390	0,02105	0,01485
i_{G2}	15,28	14,50	15,35	14,60	13,16	21,87	19,41	14,96

... / ...

TABLA IV - (Continuación)

... / ...

t_{s1}	17	28,55	29,35	27,80	27,75	22,35	30,75	27,55	27,55
t_{w1}	18	13,60	14,10	16,40	14,30	12,10	16,65	16,00	14,10
t_1	19	28,15	29,65	27,65	27,10	21,30	30,35	26,20	27,85
x_1	20	0,00435	0,00465	0,00790	0,00540	0,00530	0,00700	0,00745	0,00535
i_{G1}	21	9,44	9,99	11,28	9,83	8,35	11,58	10,85	9,98
$i_{G2-i_{G1}}$	22	5,84	4,51	4,07	4,77	4,81	10,29	8,56	4,98
ΔI_G	23	15.600	13.100	12.900	16.700	18.500	16.900	16.300	10.400
$\Delta I_L - \Delta I_G$	24	+ 700	0	+ 100	- 600	+ 300	+ 200	+ 600	0
ξI	25	+ 5	0	+ 1	- 3	+ 2	+ 2	+ 4	0
Pend.	26	1,26 (1,30)	1,11 (1,19)	0,89 (0,89)	0,57 (0,62)	0,42 (0,46)	2,02 (2,45)	2,23 (2,16)	1,98 (2,10)
Int.	27	1,07 (1,08)	1,09 (1,04)	1,11 (1,08)	1,39 (1,30)	1,70 (1,73)	1,35 (1,37)	1,29 (1,24)	1,13 (1,11)
L	28	4.190	4.300	4.210	4.300	4.185	6.110	6.090	6.110
G	29	5.530	5.990	6.590	7.270	7.950	3.420	3.955	4.320
\bar{T}	30	27,8	25,9	26,9	27,5	25,8	33,1	30,3	24,9
\bar{F}	31	26,7	27,2	26,1	25,1	20,6	30,2	26,8 ^c	26,2
\bar{x}	32	0,0098	0,0093	0,0117	0,0101	0,0096	0,0154	0,0142	0,0101
\bar{i}_G	33	12,4	12,2	13,3	12,2	10,7	16,7	15,1	12,4

... / ...

TABLA IV - (Continuación)

•
•
•
—
•
•
•

[illegible]

TABLA V - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 24 al 31.

Nº. . . 1	24	25	26	27	28	29	30	31
Fecha/ orden . . 2	14/8/65-II	7/9/65-V	24/6/65-I	15/7/65-I	26/8/65-IV	9/9/65-I	14/7/65-I	12/7/65-I
Lect./ hora . . . 3	3 ^a -13.45	2 ^a -20.30	2 ^a -12.40	1 ^a -20.10	1 ^a -21.45	1 ^a -11.45	3 ^a -13.10	2 ^a -12.40
π . . . 4	710	708	708	706	709	705	706	707
$t_{amb.}$ 5	32,3	23,7	34,2	29,1	28,1	23,8	30,2	32,7
M_L 6	3.030	2.960	3.175	2.925	2.960	2.900	2.950	3.900
T_2 7	35,70	28,20	33,95	27,25	29,60	29,30	28,60	28,00
T_1 8	28,75	23,10	27,60	22,95	23,70	23,30	23,15	25,90
T_2-T_1 9	6,95	5,10	6,35	4,30	5,90	6,00	5,45	2,10
ΔI_L 10	21.000	15.100	20.200	12.600	17.400	17.400	16.100	8.200
M_G 11	2.365	2.760	2.955	3.260	3.550	3.765	3.620	1.530
t_{s2} 12	30,65	23,25	31,05	25,85	24,85	21,85	25,00	29,65
t_{w2} 13	25,95	20,20	25,00	20,75	21,15	20,65	21,10	24,80
t_2 14	29,30	22,40	28,70	24,05	23,50	21,80	23,25	27,75
x_2 15	0,02180	0,01490	0,01910	0,01495	0,01555	0,01605	0,01545	0,01930
i_{G2} 16	20,42	14,44	18,50	14,90	15,12	15,00	14,93	18,55

... / ...

⋮

TABLA V - (Continuación)

... / ...

k'a	34	18.300 ±250/2.7	19.800 ±350/3.5	20.400 ±200/2.0	22.000 ±200/1.8	31.800 ±400/2.5	38.400 ±900/4.7	34.900 ±350/2.0	12.500 ±100/1.6
h _G a	35	4.535 ±65/2.9	4.860 ±100/4.1	5.025 ±40/1.6	5.400 ±50/1.9	7.810 ±100/2.6	9.450 ±220/4.7	8.580 ±80/1.9	3.070 ±25/1.6
h _L a	36	32.500 ±1.500/ 9.3	27.300 ±1.600/ 11.8	26.600 ±800/6.0	24.400 ±700/5.7	22.100 ±700/6.3	19.300 ±1.200/ 12.4	20.500 ±600/5.9	33.800 ±1.500/ 8.9
1	37	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354

TABLA VI - Influencia de los caudales de aire y agua: Números 32 al 39.

Nº.	1	32	33	34	35	36	37	38	39
Fecha/ orden ..	2	8/9/65-IV	8/7/65-I	16/9/65-I	6/7/65-I	6/7/65-I	22/7/65-I	22/7/65-II	22/7/65-III
Lect./ hora ...	3	2a-20.15	2a-12.35	3a-11.35	1a-19.20	2a-19.30	3a-17.45	3a-19.50	2a-21.05
π ...	4	704	708	711	705	705	702	702	702
tamb. ..	5	26,4	27,5	25,4	30,8	30,6	(30,8)	31,2	29,7
M_L	6	3.895	3.900	3.885	3.900	3.900	3.880	3.925	3.925
T_2	7	30,60	30,20	29,90	29,10	29,05	27,45	36,20	34,15
T_1	8	26,95	26,20	25,75	25,45	25,40	24,15	29,45	28,20
T_2-T_1	9	3,65	4,00	4,15	3,65	3,65	3,30	6,75	5,95
ΔI_L	10	14.200	15.500	16.100	14.200	14.200	12.800	26.500	23.400
M_G	11	1.870	2.130	2.420	2.630	2.640	2.905	2.910	2.915
t_{s2}	12	26,60	27,25	24,85	28,80	28,70	27,80	30,05	29,95
t_{w2}	13	24,05	23,55	22,95	23,60	23,45	23,00	27,15	17,30
t_2	14	26,55	26,25	24,95	27,40	27,25	26,15	29,50	28,95
x_2	15	0,01940	0,01810	0,01820	0,01770	0,01750	0,01735	0,02380	0,02200
i_{G2}	16	18,21	17,34	17,07	17,39	17,15	16,87	21,63	20,25

... / ...

TABLA VI - (Continuación)

... / ...

t_{s1}	17	26,85	27,05	24,90	31,70	30,55	30,05	31,15	29,95
t_{w1}	18	15,15	14,50	14,90	17,10	16,95	16,90	17,50	17,30
t_1	19	26,00	26,00	24,05	30,95	30,65	30,75	30,15	28,95
x_1	20	0,00685	0,00602	0,00715	0,00710	0,00725	0,00775	0,00780	0,00845
i_{G1}	21	10,43	9,92	10,17	11,77	11,85	12,13	12,13	12,15
$i_{G2}-i_{G1}$	22	7,78	7,42	6,90	5,62	5,30	4,74	9,50	8,10
ΔI_G	23	14,500	15,800	16,700	14,700	14,000	13,700	27,600	23,600
$\Delta I_L-\Delta I_G$	24	+ 300	+ 300	+ 600	+ 500	- 200	+ 900	+ 1,100	+ 200
ξI	25	+ 2	+ 2	+ 4	+ 3	- 1	+ 7	+ 4	+ 1
Pend.	26	2,45 (2,34)	2,76 (2,81)	1,64 (1,82)	2,58	2,41 (2,50)	2,06	1,54	1,52 (1,50)
Int.	27	1,26 (1,30)	1,15 (1,13)	1,35 (1,29)	1,12	1,08 (1,06)	1,27	1,44	1,40 (1,41)
L	28	8,060	8,080	8,050	8,080	8,080	8,040	8,125	8,125
G	29	3,870	4,415	5,015	5,450	5,480	6,015	6,025	6,040
\overline{T}	30	28,8	28,2	27,8	27,3	27,2	25,8	32,8	31,2
\overline{t}	31	26,3 ^c	26,1 ^c	24,5 ^c	29,2	29,0	28,4	29,8 ^c	28,9
\overline{x}	32	0,0131	0,0120	0,0127	0,0124	0,0124	0,0126	0,0158	0,0152
\overline{i}_G	33	14,3	13,6	13,6	14,5	14,0	14,5	16,9	16,2

... / ...

TABLA VI - (Continuación)

... / ...

k'a	34	13.800 ±210/3.0	14.400 ±210/2.9	19.100 ±350/3.7	17.200 ±200/2.3	16.700 ±200/2.4	21.500 ±240/2.2	24.500 ±350/2.9	23.800 ±350/2.9	
h _G a	35	3.400 ±50/3.1	3.540 ±50/3.0	4.710 ±90/3.6	4.250 ±50/2.3	4.110 ±50/2.4	5.300 ±60/2.3	6.080 ±90/2.8	5.900 ±80/2.7	
h _L a	36	33.800 ±2.100/12.4	39.700 ±2.500/12.6	31.300 ±2.200/14.1	44.600 ±2.100/9.4	40.200 ±1.900/9.4	44.300 ±2.000/9.0	37.700 ±1.700/9.0	36.100 ±1.700/9.4	
I	37	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	

TABLA VII - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 40 al 47.

Nº.	40	41	42	43	44	45	46	47
Fecha/ orden ..	22/7/65-IV	22/7/65-VI	2/7/65-1	2/7/65-I	2/7/65-I	1/7/65-II	23/7/65-II	14/7/65-II
Lect./ hora ...	2ª-22.00	3ª-24,30	1ª-12.10	2ª-12.23	3ª-12.45	3ª-19.55	2ª-12.10	2ª-18.00
π	703	703	705	705	705	704	704	705
$t_{amb.}$	28,9	(24,0)	31,0	31,3	31,7	29,7	(30,0)	30,3
ML	3.990	3.900	3.825	3.830	3.825	3.800	3.775	3.925
T2	32,40	28,80	30,55	30,80	30,75	26,40	24,90	30,30
T1	26,20	24,50	26,00	26,10	26,00	22,85	21,80	25,50
T_2-T_1	5,20	4,30	4,55	4,70	4,75	3,55	3,10	4,80
ΔIL	20.800	16.800	17.300	18.000	18.200	13.500	11.700	18.800
Mg	2.920	3.005	3.230	3.150	3.160	3.440	3.415	3.645
t_{s2}	27,95	24,50	27,80	27,90	27,90	25,05	24,95	26,25
t_{w2}	25,05	22,30	24,05	24,25	24,15	21,45	20,95	23,80
t_2	27,45	23,90	26,35	26,70	26,55	23,65	23,10	25,60
x_2	0,02065	0,01745	0,01900	0,01905	0,01890	0,01600	0,01530	0,01915
iG_2	19,24	16,37	17,85	17,96	17,88	15,42	14,76	17,80

... / ...

TABLA VII - (Continuación)

... / ...

k'a	34	22.900 ±350/3.0	24.000 ±500/4.2	29.300 ±300/2.0	25.100 ±325/2.6	26.700 ±300/2.2	32.200 ±400/2.5	30.300 ±340/2.2	37.800 ±500/2.6
h _{ga}	35	5.660 ±90/3.1	5.920 ±120/4.2	7.240 ±80/2.1	6.210 ±80/2.6	6.550 ±80/2.3	7.930 ±95/2.5	7.440 ±100/2.3	9.340 ±125/2.7
h _{La}	36	46.100 ±2.600/ 11.3	32.900 ±2.200/ 13.4	30.800 ±1.100/ 7.1	28.300 ±1.150/ 8.1	32.100 ±1.200/ 7.5	24.000 ±800/6.7	29.100 ±1.050/ 7.2	28.600 ±1.050/ 7.3
1	37	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354

TABLA VIII - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 48 al 55.

	48	49	50	51	52	53	54	55
1	20/7/65-IV	20/7/65-IV	8/9/65-V	9/7/65-I	20/7/65-III	20/7/65-III	20/7/65-III	6/7/65-II
2	1a-19.37	3a-20.00	2a-22.00	1a-11.20	1a-18.20	2a-18.25	4a-18.40	1a-21.10
3	704	704	705	708	704	704	704	705
4	28,4	(28,4)	24,8	26,5	29,2	29,2	29,2	27,9
6	4.900	4.900	4.850	4.860	4.880	4.880	4.880	4.860
7	26,70	26,50	30,80	30,95	25,55	25,50	25,40	28,35
8	24,20	23,95	27,40	27,45	22,90	22,90	22,80	25,15
9	2,50	2,55	3,40	3,50	2,65	2,60	2,60	3,20
10	12.200	12.500	16.500	17.000	12.900	12.700	12.700	15.500
11	1.900	1.890	1.900	2.110	2.360	2.370	2.370	2.660
12	26,80	26,60	26,60	26,70	27,35	27,00	26,80	27,20
13	22,35	22,10	24,65	25,00	21,65	21,50	21,30	23,55
14	25,60	25,40	26,20	27,10	25,20	25,20	25,10	26,20
15	0,01660	0,01635	0,02085	0,02095	0,01530	0,01525	0,01495	0,01840
16	16,25	16,07	19,03	19,30	15,50	15,36	15,16	17,50
17	28,40	28,20	24,50	26,35	29,10	28,95	28,95	28,45
18	13,20	12,95	14,85	16,40	13,70	13,55	13,35	17,15
19	28,75	28,45	22,60	25,35	29,75	29,65	29,55	27,65
20	0,00415	0,00360	0,00740	0,00845	0,00430	0,00425	0,00400	0,00840
21	9,45	9,07	9,95	11,26	9,80	9,77	9,54	11,77
22	6,80	7,00	9,08	8,03	5,70	5,59	5,62	5,73

... / ...

⋮

[illegible]

TABLA IX - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 56 al 63.

	56	57	58	59	60	61	62	63
1	21/7/65-I	8/9/65-II	2/7/65-II	2/7/65-II	21/7/65-II	14/7/65-III	21/7/65-III	20/7/65-I
2	2 ^a 11.10	2 ^a 11.55	1 ^a 13.40	2 ^a 13.50	1 ^a 12.45	1 ^a 20.00	4 ^a 18.50	3 ^a 13.40
3	706	707	705	705	705	705	703	706
4	(26,0)	25,7	32,7	32,9	30,0	29,1	28,7	30,3
5								
6	4.840	4.830	4.860	4.860	4.870	4.880	3.925	3.950
7	26,20	27,30	29,35	29,25	25,60	29,05	25,67	25,85
8	23,10	23,40	25,80	25,70	22,30	25,15	21,65	22,31
9	3,10	3,90	3,55	3,55	3,30	3,90	3,72	3,54
10	15.000	18.800	17.300	17.300	16.100	19.000	14.600	14.000
11	2.940	3.020	3.155	3.175	3.440	3.675	3.100	3.160
12	24,40	23,70	27,80	27,75	24,45	26,20	24,20	25,80
13	21,35	21,30	24,40	24,55	21,25	24,15	20,40	20,80
14	23,75	23,20	26,70	26,65	23,05	25,45	22,85	23,80
15	0,01605	0,01630	0,01950	0,02040	0,01635	0,01980	0,01477	0,01465
16	15,48	15,51	18,33	18,87	15,50	18,19	14,47	14,65
17	26,20	25,55	31,85	31,50	28,40	29,55	28,55	29,55
18	14,20	14,20	17,90	18,25	14,80	17,95	13,90	14,30
19	26,30	25,20	32,05	31,85	28,75	29,65	29,80	29,65
20	0,00600	0,00620	0,00805	0,00875	0,00585	0,00925	0,00472	0,00472
21	10,01	9,85	12,66	13,01	10,52	12,79	10,07	10,05
22	5,47	5,66	5,67	5,86	4,98	5,40	4,40	4,60

... / ...

TABLA X - Influencia de los caudales de aire y agua:
Números 64 y 65.
Influencia de las condiciones del aire:
Números 67 al 71.

	64	65	66	67	68	69	70	71
1								
2	7/7/65-I	25/6/65-I	30/9/65-II	3/9/65-II	21/9/65-IV	27/8/65-IV	21/9/65-III	27/8/65-I
3	3a 13.30	1a 12.00	2a 18.05	3a 18.20	1a 20.15	2a 23.15	2a 19.50	2a 17.50
4	705	708	702	705	709	709	709	708
5	31,7	33,1	18,0	22,3	25,7	27,6	27,6	33,2
6								
7	2.950	2.975		2.900	2.945	2.940	2.930	2.940
8	31,50	33,70		29,78	30,90	31,78	32,18	32,58
9	25,85	27,40		24,58	25,77	26,63	26,85	27,60
10	5,65	6,30		5,20	5,13	5,15	5,33	4,98
	16.700	18.700	Datos erro- neous.	15.100	15.100	15.100	15.600	14.700
11								
12	2.670	2.645		2.150	2.120	2.135	2.100	2.090
13	29,05	30,50		22,90	26,25	27,45	27,19	30,75
14	23,30	24,80		21,40	23,45	24,05	24,61	25,75
15	27,15	28,50		23,25	25,70	27,00	26,86	29,45
16	0,01715	0,01985		0,01671	0,01848	0,01905	0,01911	0,02057
	16,98	18,92		15,77	17,41	18,12	18,12	19,66
17								
18	30,50	32,05		21,90	25,85	28,00	26,74	32,65
19	15,35	16,35		12,30	14,50	16,45	16,00	17,10
20	30,55	31,85		20,50	24,35	27,65	25,52	32,90
21	0,00550	0,00605		0,00572	0,00648	0,00779	0,00776	0,00676
22	10,73	11,34		8,41	9,80	11,41	10,87	12,08
	6,25	7,58		7,36	7,61	6,71	7,25	7,58

... / ...

TABLA XI - Influencia de las condiciones del aire:
Números 72 al 79

	72	73	74	75	76	77	78	79
1	30/9/65-I	7/9/65-I	3/9/65-I	4/9/65-I	7/9/65-IV	28/8/65-I	28/8/65-II	7/9/65-III
2	2 ^a 11.48	3 ^a 10.37	3 ^a 18.30	1 ^a 12.10	1 ^a 19.05	2 ^a 11.47	1 ^a 14.02	2 ^a 18.05
3	701	710	705	705	708	709	709	708
4	17,8	21,9	23,4	24,9	26,9	30,1	33,9	27,7
6	2.770	2.900	2.910	2.940	2.920	2.940	2.950	2.025
7	24,25	28,33	27,78	31,33	28,93	32,68	33,48	29,38
8	20,14	22,17	22,17	24,15	23,37	26,35	26,90	23,77
9	4,11	6,16	5,61	7,18	5,56	6,33	6,58	5,61
10	11.400	17.900	16.300	21.100	16.200	18.600	19.400	11.400
11	3.310	3.350	3.310	3.300	3.310	3.170	3.210	2.040
12	18,63	21,00	21,80	22,90	24,70	27,85	30,05	25,85
13	17,75	18,95	19,20	20,74	20,85	23,95	24,75	21,65
14	19,22	20,75	21,20	22,55	23,15	26,50	28,10	24,95
15	0,01341	0,01403	0,01400	0,01575	0,01512	0,01864	0,01905	0,01447
16	12,74	13,52	13,60	14,99	14,78	17,72	18,40	14,97
17	18,35	22,05	23,30	22,95	27,05	29,80	33,10	27,55
18	12,83	11,60	12,85	12,78	13,95	16,55	17,25	14,15
19	18,30	21,30	22,75	23,50	26,70	29,70	33,05	27,45
20	0,00780	0,00484	0,00575	0,00575	0,00537	0,00719	0,00675	0,00534
21	9,13	8,08	8,95	9,17	9,71	11,55	12,10	9,87
22	3.60	5,44	4,61	5,82	5,07	6,17	6,30	5,10

... / ...

TABLA XII - Influencia de las condiciones del aire:
Números 80 al 85.
Influencia de la temperatura del agua: Números 86 y 87.

	80	81	82	83	84	85	86	87
1								
2	7/9/65-II	6/9/65-III	31/8/65-I	31/8/65-I	31/8/65-II	6/9/65-I	20/9/65-II	30/8/65-IV
3	2 ^a 12.15	1 ^a 21.30	1 ^a 17.23	4 ^a 17.55	1 ^a 19.50	1 ^a 12.35	2 ^a 17.45	2 ^a 21.48
4	710	708	705	705	704	710	712	705
5	26,0	20,7	23,6	23,6	23,2	25,7	28,7	28,1
6	3.900	1.970	3.875	3.875	3.870	3.875	2.105	2.080
7	30,48	27,23	26,03	26,23	25,78	27,38	23,23	27,38
8	26,79	19,87	23,49	23,42	23,09	22,90	20,51	22,37
9	4,21	7,36	2,54	2,81	2,69	4,48	2,72	5,01
10	16.400	14.500	9.800	10.900	10.400	17.300	5.700	10.400
11	2.080	3.440	3.275	3.295	3.280	3.305	2.620	2.710
12	25,30	19,45	22,75	22,75	22,40	22,50	25,35	25,90
13	23,00	17,20	21,75	21,80	21,45	20,40	20,05	20,85
14	25,40	18,50	22,65	22,70	22,35	22,35	23,42	23,80
15	0,01814	0,01235	0,01745	0,01747	0,01705	0,01534	0,01377	0,01479
16	17,16	11,91	16,06	16,07	15,75	14,71	13,99	14,74
17	25,35	19,90	23,65	23,65	23,15	24,30	28,30	27,40
18	12,75	11,65	18,15	18,05	17,40	13,55	16,45	15,68
19	24,80	18,70	23,40	23,20	22,90	24,65	29,30	26,60
20	0,00473	0,00585	0,01184	0,01172	0,01114	0,00603	0,00764	0,00722
21	8,86	8,06	12,83	12,73	12,29	9,61	11,72	10,81
22	8,30	3,85	3,23	3,34	3,46	5,10	2,28	3,93

... / ...

TABLA XIII - Influencia de la temperatura del agua:
Números 88 al 95

	88	89	90	91	92	93	94	95
1	20/9/65-I	30/8/65-III	30/8/65-III	30/8/65-I	22/9/65-III	18/9/65-I	17/9/65-III	24/9/65-I
2	3a 12.15	1a 19.45	1a 17.55	1a 12.45	3a 21.23	2a 11.27	1a 20.40	1a 12.30
3	713	704	704	706	705	708	707	701
4	(28,0)	32,2	34,8	34,8	23,7	24,3	25,3	24,2
5								
6	2.105	2.050	2.040	2.000	3.870	3.870	3.820	3.870
7	29,78	34,02	38,58	42,78	22,60	26,18	28,80	32,20
8	24,98	26,29	28,65	30,07	20,65	23,17	24,78	27,06
9	5,20	7,73	9,93	12,71	1,95	3,01	4,02	5,14
10	10.900	15.800	20.200	25.400	7.550	11.600	15.400	19.900
11	2.650	2.640	2.580	2.615	2.680	2.660	2.680	2.650
12	26,70	30,20	32,60	32,35	22,55	23,90	25,20	25,05
13	23,45	24,50	26,70	28,20	19,50	21,15	22,60	24,25
14	25,60	28,30	31,00	31,50	21,55	23,30	24,70	25,90
15	0,01817	0,01874	0,02177	0,02470	0,01412	0,01604	0,01722	0,02052
16	17,23	18,26	20,76	22,72	13,97	15,34	16,43	18,70
17	28.00	32,35	34,50	33,75	23,75	23,90	25,05	24,15
18	18,60	16,95	17,35	18,30	15,50	15,75	15,50	16,00
19	28,00	31,90	34,50	33,15	23,85	23,70	24,04	23,30
20	0,01063	0,00670	0,00640	0,00791	0,00850	0,00866	0,00798	0,00902
21	13,23	11,79	12,24	12,84	10,91	10,97	10,79	11,09
22	4,00	6,47	8,52	9,88	3,06	4,37	5,64	7,60

... / ...

TABLA XIV - Influencia de la temperatura del agua: Números 96 al 100.
Influencia de las condiciones del aire: Números 101 al 103

	96	97	98	99	100	101	102	103
1								
2	20/9/65-III	22/9/65-II	22/9/65-I	20/9/65-IV	21/9/65-I	28/9/65-I	27/8/65-III	27/8/65-II
3	1 ^a 19.25	3 ^a 20.28	2 ^a 19.32	1 ^a 20.35	2 ^a 11.00	2 ^a 12.00	2 ^a 20.45	3 ^a 19.35
4	712	705	706	712	714	704	708	708
5	27,9	24,2	25,2	25,5	26,3	16,7	28,8	32,8
6	3.840	2.180	2.080	3.900	3.880	2.920	2.940	2.940
7	39,15	33,75	34,45	32,20	34,02	22,77	31,48	32,88
8	31,43	26,47	25,77	27,77	28,18	19,35	26,38	27,32
9	7,72	7,28	8,68	4,43	5,84	3,42	5,10	5,06
10	29.600	15,900	18.000	17.300	22.600	10.000	15.000	14.900
11	2.670	2.140	3.320	2.130	3.280	3.300	2.140	2.090
12	29,40	25,25	24,95	26,85	26,20	17,00	27,95	30,20
13	28,60	24,10	23,15	25,15	25,51	16,40	24,10	25,25
14	30,25	25,77	24,57	27,10	26,73	17,72	26,85	28,90
15	0,02593	0,02040	0,01856	0,02098	0,02173	0,01243	0,01888	0,01991
16	23,10	18,43	17,20	19,27	19,64	11,80	17,99	19,12
17	28,20	24,65	26,00	25,75	26,24	16,45	28,45	32,00
18	17,70	15,40	16,50	16,10	18,04	11,80	15,65	16,50
19	26,35	23,20	24,50	24,60	25,58	16,45	27,15	32,05
20	0,00930	0,00785	0,00880	0,00833	0,01046	0,00742	0,00671	0,00627
21	12,00	10,35	11,25	11,00	12,50	8,45	10,63	11,58
22	11,10	8,08	5,96	8,28	7,14	3,35	7,36	7,54

... / ...

TABLA XV - Estudio de efectos finales: Números 104 al 110.

1	104	105	106	107	108	109	110
2	19/10/65-I	25/9/65-I	19/10/65-II	25/9/65-II	23/9/65-III	23/9/65-II	23/9/65-IV
3	3a 11.44	1a 11.50	3a 17.40	3a 13.35	1a 17.05	1a 13.10	1a 19.45
4	706	694	705	694	701	704	701
5	18,3	16,9	(19,5)	17,1	(24,5)	25,5	25,2
6	2.040	2.090	3.890	3.910	2.120	2.120	3.900
7	24,60	25,83	23,90	24,26	34,20	32,30	30,85
8	22,02	21,57	22,25	21,52	26,97	24,85	26,75
9	2,58	4,26	1,65	2,74	7,23	7,45	4,10
10	5.200	8.900	6.400	10.700	15.400	15.800	16.000
11	2.110	3.200	2.100	3.230	2.020	3.250	2.150
12	18,85	17,50	19,45	17,26	27,10	24,05	26,00
13	17,90	16,45	18,25	16,89	25,00	22,50	24,08
14	19,82	17,78	20,30	17,91	27,25	23,95	26,14
15	0,01342	0,01244	0,01365	0,01305	0,02105	0,01764	0,02000
16	12,91	11,81	13,26	12,24	19,40	16,48	18,45
17	18,50	18,10	18,90	17,65	27,25	25,30	25,65
18	15,15	13,25	14,70	12,86	16,05	16,65	15,30
19	19,15	16,00	19,28	16,74	26,40	24,55	24,27
20	0,01004	0,00844	0,00955	0,00824	0,00769	0,00927	0,00766
21	10,69	8,96	10,52	9,00	11,03	11,53	10,10
22	2,22	2,85	2,74	3,24	8,37	4,95	8,35

... / ...

TABLA XV - (Continuación)

.... /

23	4.700	9.300	5.800	10.500	17.000	16.100	17.800
24	- 500	+ 400	- 600	- 200	+ 1.600	+ 300	+ 1.800
25	- 9	+ 5	- 9	- 2	+ 11	+ 2	+ 11
26	0,94	0,65	1,59	0,41	1,78	0,67	2,38
27	0,78	0,89	0,82	1,58	1,27	1,40	1,34
28	4.220	4.325	8.060	8.100	4.385	4.385	8.075
29	4.370	6.800	4.350	6.690	4.250	6.745	4.460
30	23,3	23,7	23,1	22,9	30,6	28,6	28,8
31	19,5 ^c	16,9 ^c	19,8 ^c	17,1 ^c	26,8 ^c	24,2	25,2 ^c
32	0,0117	0,0104	0,0116	0,0106	0,0144	0,0135	0,0138
33	11,8	10,4	11,9	10,6	15,2	14,0	14,3
34	16.000	28.500	16.700	50.000	15.500	26.600	16.900
	+ 660/8.3	+ 1.450/ 10.2	+ 610/7.3	+ 2.175/ 8.7	+ 260/3.4	+ 550/4.1	+ 325/3.8
35	4.000	7.000	4.120	12.000	3.700	6.600	4.200
	+ 120/8.3	+ 360/10.2	+ 150/7.3	+ 540/8.7	+ 60/3.3	+ 135/4.1	+ 80/3.8
36	15.100	18.800	26.600	20.000	27.000	18.000	40.000
	+ 1.900/ 25.2	+ 2.700/ 28.7	+ 3.650/ 27.4	+ 2.200/ 22.0	+ 1.630/ 12.1	+ 1.000/ 11.1	+ 3.100/ 15.5
37	0,212	0,212	0,212	0,212	0,354	0,354	0,354

VI - DISCUSION DE LOS RESULTADOS
=====

VI - DISCUSION DE LOS RESULTADOS =====

Los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos efectuados con la torre piloto de enfriamiento de agua se analizaron siempre sobre la base de semejanza de su comportamiento con el de las torres industriales, a fin de deducir conclusiones prácticas utilizables al diseñar aquellas torres de enfriamiento que se montasen con el tipo de relleno ensayado en la torre experimental.

El estudio crítico sistemático de los resultados experimentales se orientó a evaluar y discutir primero la influencia de las variables secundarias (temperatura del agua y condiciones del aire) sobre los coeficientes volumétricos individuales. Posteriormente se estudió la influencia sobre los tres coeficientes de transporte de las variables principales (velocidades másicas del aire y del agua), a fin de deducir ecuaciones representativas para cada uno. Por último, se estudiaron los resultados experimentales de ensayos con altura de relleno

reducida para comprobar las condiciones de no-existencia de efectos finales. Para el margen de error debido a los datos experimentales, con que se obtienen los coeficientes el empleo del ordenador electrónico permite calcular y analizar con toda seguridad y precisión los datos.

Aunque no supone una reducción notable en el tiempo de cálculo de cada experimento, pues el tanteo de la construcción de Mickley ocupa a la máquina veinte minutos con el programa preparado y éste es también el tiempo aproximado que tarda en hacerse el tanteo gráfico manualmente, pueden deducirse consecuencias exactas sobre el grado de error debido al método.

VI-1.

Influencia de la temperatura del agua sobre los coeficientes volumétricos individuales de transporte.

Se realizaron 15 experimentos sistemáticos, números 86 á 100, para estudiar la influencia de la temperatura del agua sobre los tres coeficientes. Los experimentos se llevaron a cabo en dos series, la primera a una velocidad másica del agua $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$, y la segunda a $L = 8.000 \text{ Kg/h.m}^2$ aproximadamente. En ambas series se mantuvo constante la velocidad másica del aire a un valor medio $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$. También se realizaron algunos experimentos aislados, dentro de cada serie, a valores distintos de la velocidad másica del

TABLA XVI - Influencia de la temperatura del agua sobre los tres coeficientes.

Nº	7	8	30	28	29	34	k'a	35	hga	36
	T2	T1	T	L	G#	k'a	corr.##	hga	corr.##	hja
86	23,2	20,5	21,9	4.360	5.425	17.500	17.700	4.315	4.350	26.600
87	27,4	22,4	24,9	4.300	5.640	17.200	16.800	4.240	4.140	22.700
88	29,8	25,0	27,4	4.360	5.490	19.400	19.500	4.810	4.830	20.500
89	34,0	26,3	30,2	4.240	5.470	17.600	17.700	4.350	4.370	25.800
90	38,6	28,6	33,6	4.220	5.345	17.200	17.700	4.250	4.380	27.800
91	42,8	30,1	36,4	4.135	5.420	18.900	19.300	4.705	4.800	25.500
14	31,8	24,3	28,0	4.190	5.510	16.700	16.700	4.100	4.100	22.500
15	31,5	24,2	27,9	4.190	5.510	16.900	16.900	4.140	4.140	21.300
16	31,5	24,1	27,8	4.190	5.530	16.700	16.600	4.110	4.090	21.100
(97)	33,8	26,5	30,1	4.515	(4.430)	17.000	-	4.210	-	24.100
(98)	34,4	25,6	30,0	4.310	(6.880)	28.800	-	7.120	-	19.100
92	22,6	20,6	21,6	8.010	5.550	20.500	20.300	5.050	5.000	40.500
93	26,2	23,2	24,7	8.010	5.510	18.100	18.100	4.465	4.460	35.800
94	28,8	24,8	26,8	7.910	5.550	17.000	16.800	4.190	4.070	41.200
95	32,2	27,1	29,6	8.000	5.495	20.500	20.500	5.100	5.100	34.500
96	39,1	31,4	35,3	8.000	5.525	17.100	11.100	4.250	4.250	44.500
35	29,1	25,4	27,3	8.080	5.450	17.200	17.400	4.250	4.290	44.600
36	29,0	25,4	27,2	8.080	5.480	16.700	16.800	4.110	4.130	40.200
(99)	32,2	27,8	30,0	8.075	(4.420)	15.200	-	3.750	-	43.100
(100)	34,0	28,2	31,1	8.040	(6.800)	31.100	-	7.730	-	28.400

G media en estas series de experimentos, 5.500 Kg/h.m².

Coeficientes corregidos a los valores medios comunes de G y L en estas series.

aire: $G = 4.400$ y 6.800 Kg/h.m^2 .

Como parámetro funcional de comparación se tomó el valor de la temperatura media del agua entre la entrada y la salida de la torre. El intervalo de temperaturas estudiado fué de 20 á 40°C .

Los valores obtenidos para los coeficientes de transporte se estudiaron una vez corregidos al valor común de $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$, teniendo en cuenta los resultados del estudio previo de influencia de las variables principales G y L en el intervalo de G considerado.

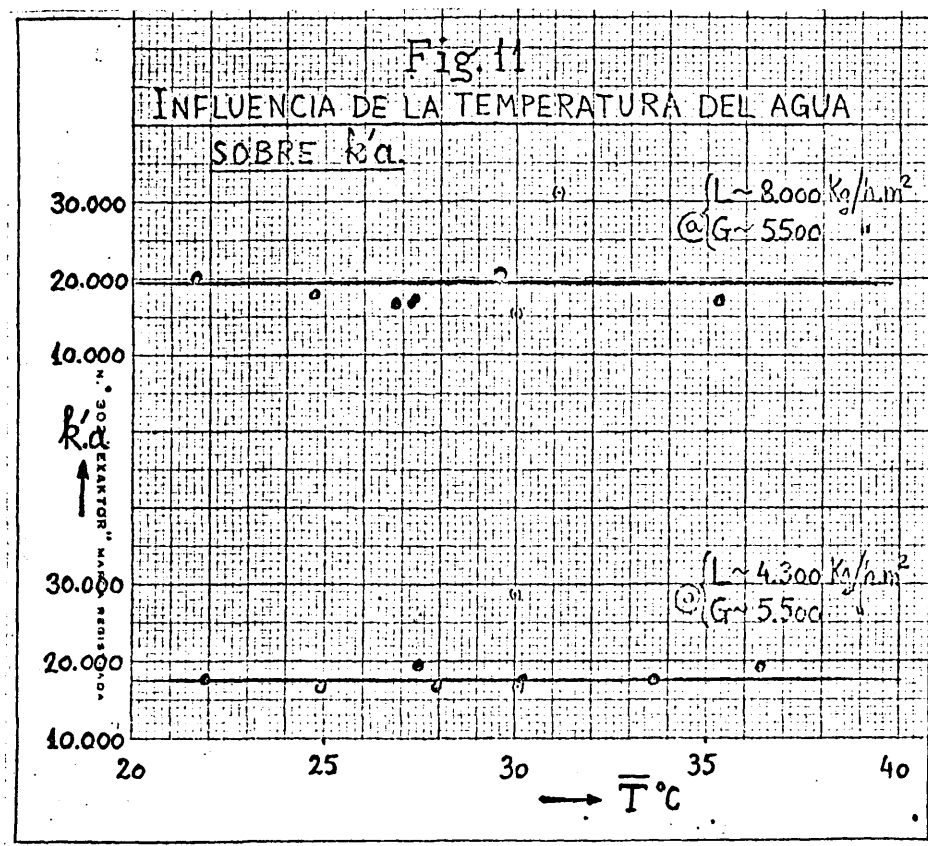
Los resultados experimentales se resumen en la Tabla XVI.

VI-1.1.

Influencia de la temperatura del agua sobre $k'a$.

La Figura 11 representa los valores corregidos del coeficiente volumétrico individual de transferencia de materia, $k'a$, frente a los de la temperatura media del agua \bar{T} , correspondientes a las dos series de experimentos realizadas. Se deduce que estadísticamente la temperatura del agua no influye sobre el valor de $k'a$, porque representando en la Fig. 11 por sendas rectas los valores de $k'a$ deducidos en función de las variables principales G y L , el 90 % de los datos ex-

perimentales corregidos se encuentra dentro de $\pm 9\%$ de dichos valores, y este error es inferior al experimental con que se obtiene $k'a$.

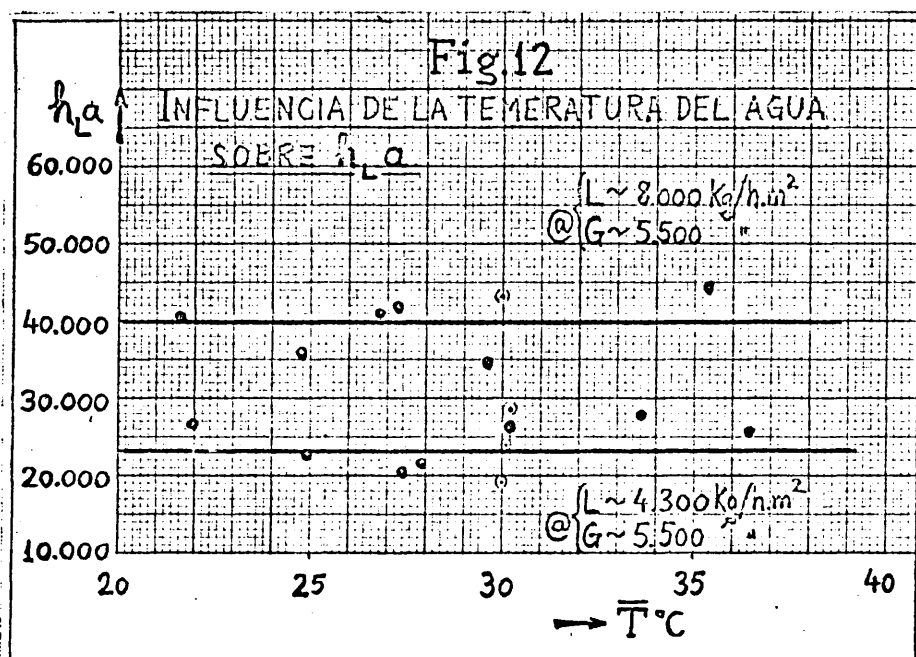


No se ha representado gráficamente la influencia de la temperatura del agua sobre el coeficiente volumétrico individual de transmisión de calor a través de la fase gaseosa h_{Ga} por existir proporcionalidad, según la relación de Lewis, entre $k'a$ y h_{Ga} .

VI-1.2.

Influencia de la temperatura del agua sobre h_{La} .

Análogamente, se han representado en la Figura 12 los valores del coeficiente volumétrico individual de transmisión de calor a través de la fase líquida, h_{La} , frente a la temperatura media del agua \bar{T} , en cada experimento de las dos series realizadas. También se deduce aquí estadísticamente que la temperatura del agua tampoco influye sobre h_{La} : el 90 % de los datos experimentales están comprendidos dentro de $\pm 12 \%$ del valor correspondiente deducido en función de la



influencia de las variables principales G y L para cada una de las dos series, y que se refleja por sendas rectas en la figura.

VI-2.

Influencia de las condiciones del aire sobre los coeficientes volumétricos individuales de transporte.

Se realizaron 22 experimentos sistemáticos para estudiar la influencia de las condiciones del aire sobre los tres coeficientes: experimentos números 67 al 85 y 101 al 103. Dichos experimentos se llevaron a cabo en dos series, la primera a una velocidad másica del aire $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$, y la segunda a $G = 6.800 \text{ Kg/h.m}^2$. aproximadamente. En ambas series se mantuvo fija la velocidad másica del agua a un valor medio de $L = 6.100 \text{ Kg./h.m}^2$, aunque también se realizaron algunos experimentos adicionales a $L = 4.100$ y 8.100 Kg/h.m^2 . respectivamente.

Como parámetros funcionales de comparación se tomaron los valores medios de la temperatura, humedad absoluta y entalpía del aire, \bar{t} , \bar{x} é \bar{i}_g respectivamente entre las condiciones a la entrada y a la salida de la torre. Los intervalos entre los que oscilaron las condiciones medias del aire fueron los siguientes:

Temperatura media del aire, \bar{t} : entre 15 y 35 °C aproxi-

TABLA XVII - Influencia de las condiciones del aire sobre los tres coeficientes.

1 Nº	31 T	32 i _G	33 x	28 L*	29 G	34 k'a	k'a** corr.	35 h _G	h _G ** corr.	h _L
23	26,2	0,0101	12,4	6.110	4.320	13.800	13.600	3.390	3.350	27.300
67	21,9	0,0112	12,1	6.000	4.455	16.100	16.300	3.960	4.000	26.300
68	25,0	0,0125	13,6	6.100	4.395	15.000	15.000	3.690	3.690	35.800
69	27,3	0,0134	14,8	6.090	4.425	14.500	14.600	3.590	3.620	28.200
70	26,2	0,0134	14,5	6.060	4.350	12.800	12.700	3.160	3.140	37.200
71	31,2	0,0137	15,9	6.090	4.330	15.000	14.800	3.720	3.670	36.300
102	27,0	0,0128	14,3	6.090	4.440	14.900	15.000	3.680	3.720	33.700
103	30,5	0,0131	15,3	6.090	4.330	14.900	14.700	3.690	3.600	33.300
{79}	26,2	0,0099	12,4	4.190	4.225	12.200	12.600	3.000	3.100	18.200
{80}	25,2	0,0114	13,0	8.075	4.310	17.000	17.300	4.185	4.340	29.100
27	26,8	0,0105	12,3	6.050	6.750	22.000	22.300	5.400	5.470	24.400
101	17,0	0,0099	10,1	6.040	6.875	26.100	25.800	6.420	6.340	19.700
72	18,8	0,0116	15,9	5.735	6.860	24.400	24.200	6.000	5.940	23.400
73	21,0	0,0095	10,8	6.000	6.940	30.000	29.200	7.360	7.230	20.000
74	22,0	0,0099	11,3	6.020	6.860	26.600	26.300	6.540	6.470	18.600
75	23,0	0,0107	12,1	6.090	6.840	29.000	28.800	7.140	7.090	18.400
76	24,9	0,0102	12,2	6.040	6.860	27.700	27.300	6.800	6.710	21.200
77	28,1	0,0129	14,6	6.090	6.570	25.500	26.700	6.310	6.610	24.800
78	30,6	0,0129	15,3	6.110	6.650	24.400	25.300	6.040	6.300	27.000
{81}	18,6	0,0091	10,0	4.080	7.125	25.600	23.700	6.290	5.810	12.300
{82}	23,0	0,0146	14,4	8.025	6.780	33.300	33.500	8.240	8.290	23.100
{83}	22,9	0,0146	14,4	8.025	6.820	32.300	32.000	8.000	7.920	24.200
{84}	22,6	0,0141	14,0	8.010	6.795	32.800	32.800	8.100	8.100	25.100
{85}	23,5	0,0107	12,2	8.025	6.845	30.400	30.000	7.470	7.370	24.600
* L media en estas series de experimentos, 6.100 Kg/h.m ² .										
** Coeficientes corregidos a los valores medios comunes de G y L en estas series.										

madamente.

Humedad absoluta media del aire, \bar{x} : entre 0,009 y 0,014 Kg. vapor/Kg. aire seco.

Entalpía media del aire, \bar{T}_G : entre 9 y 17 Kcal/Kg. aire seco.

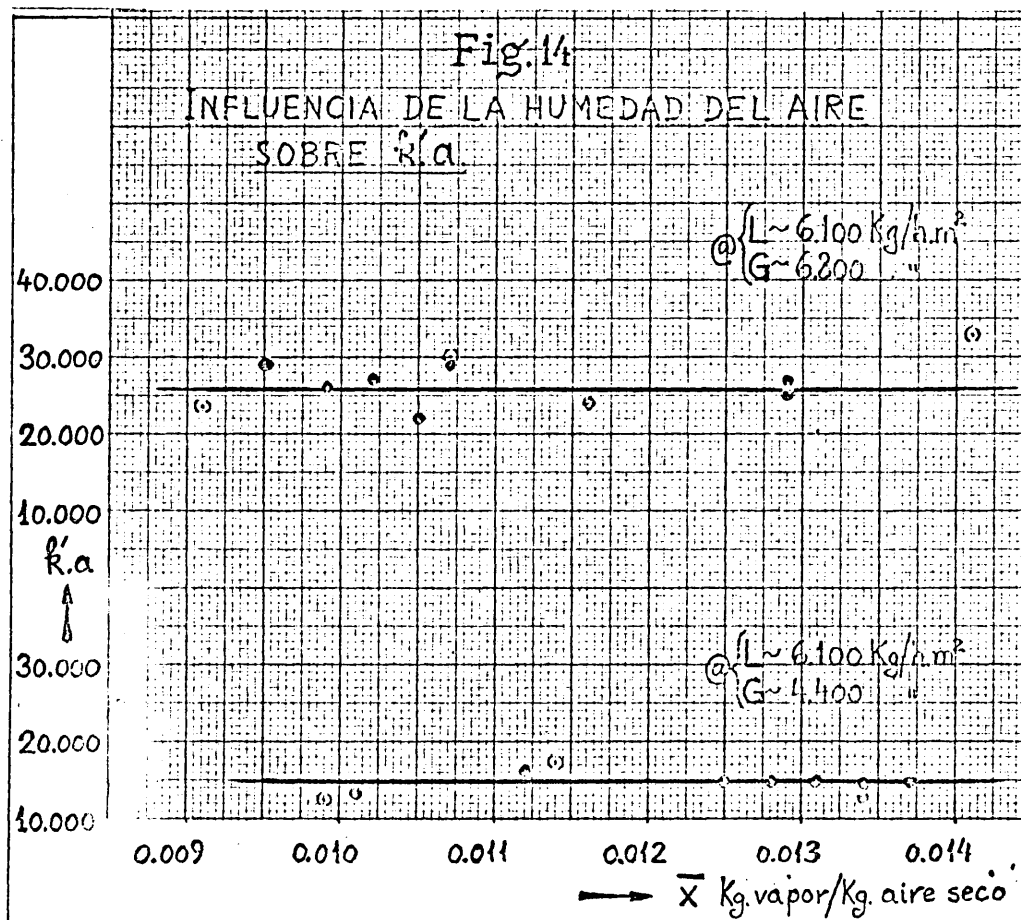
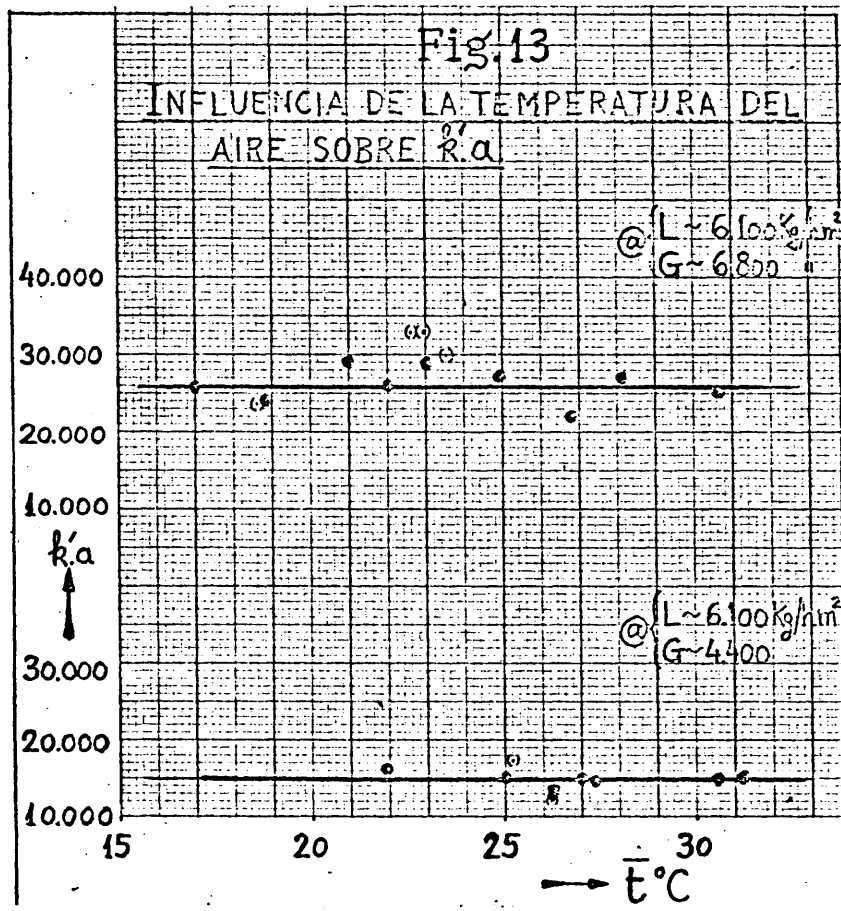
Los valores obtenidos para los coeficientes de transporte se estudiaron una vez corregidos al valor común de $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. mediante los resultados del estudio de las variables principales G y L en el intervalo de L considerado.

La Tabla XVII resume los resultados obtenidos.

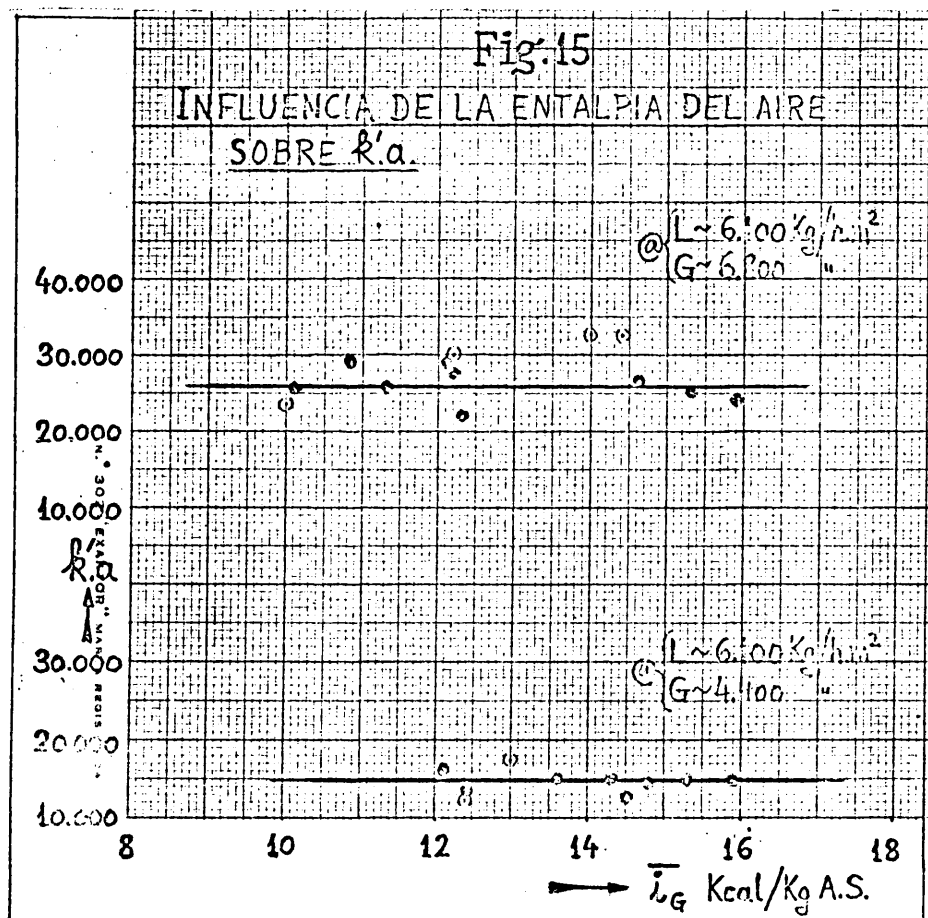
VI-2.1.

Influencia de las condiciones del aire sobre $k'a$.

La Figura 13 representa los valores corregidos del coeficiente volumétrico individual de transferencia de materia, $k'a$, frente a los de la temperatura media del aire, \bar{T} , correspondientes a las dos series de experimentos realizados. De la misma forma, en la Figura 14 se han representado los valores corregidos de $k'a$ frente a los de la humedad absoluta media del aire, \bar{x} , obtenidos en cada experimento de las dos series llevadas a cabo. Finalmente la Figura 15 re-



presenta de forma análoga los valores corregidos de $k'a$ frente a \bar{I}_G , entalpía media del aire, correspondientes a las



dos series de experimentos.

Dentro de los límites de operación ensayados, ni la temperatura, ni la humedad absoluta, ni la entalpía del aire reflejan tendencia alguna de influencia sobre $k'a$, encontrándose el 90 % de los valores experimentales corregidos de $k'a$

dentro de $\pm 9\%$ el valor deducido en función de las variables principales G y L ; dicho intervalo es inferior al de error experimental con que se obtiene $k'a$, por lo que se concluye que estadísticamente las condiciones del aire no influyen sobre el coeficiente $k'a$.

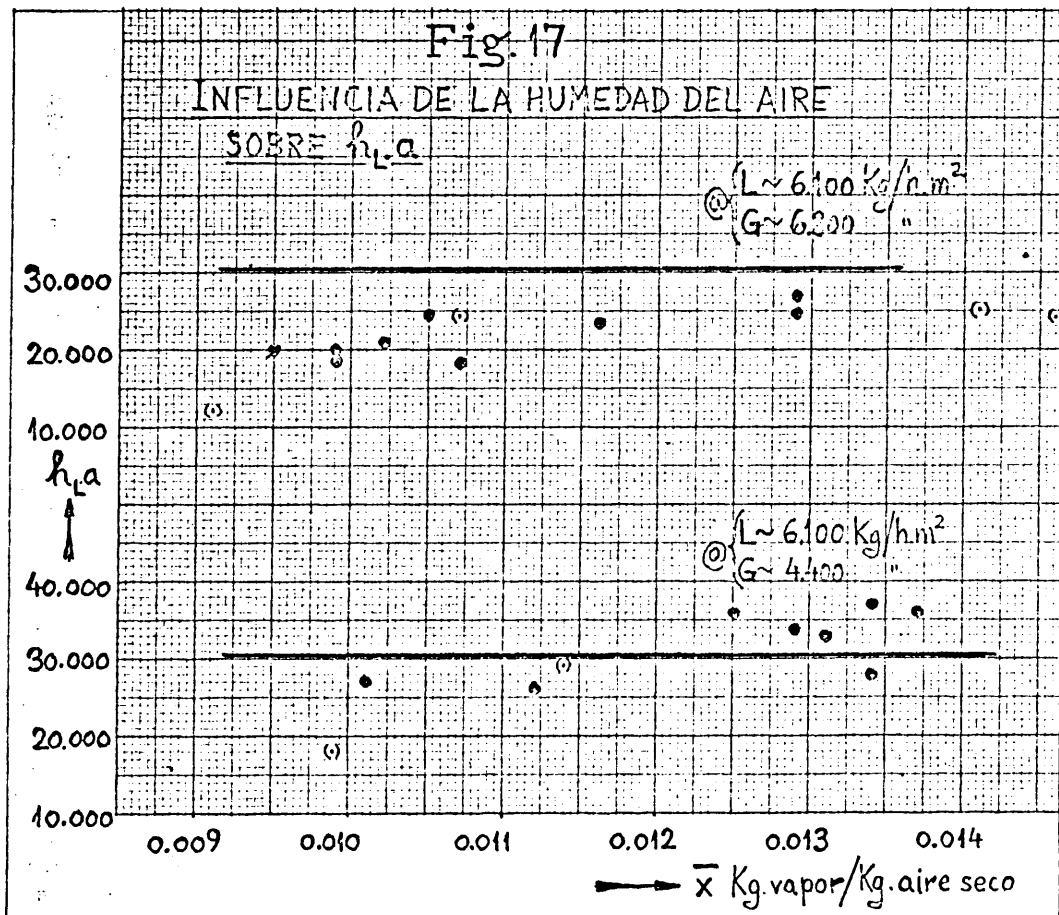
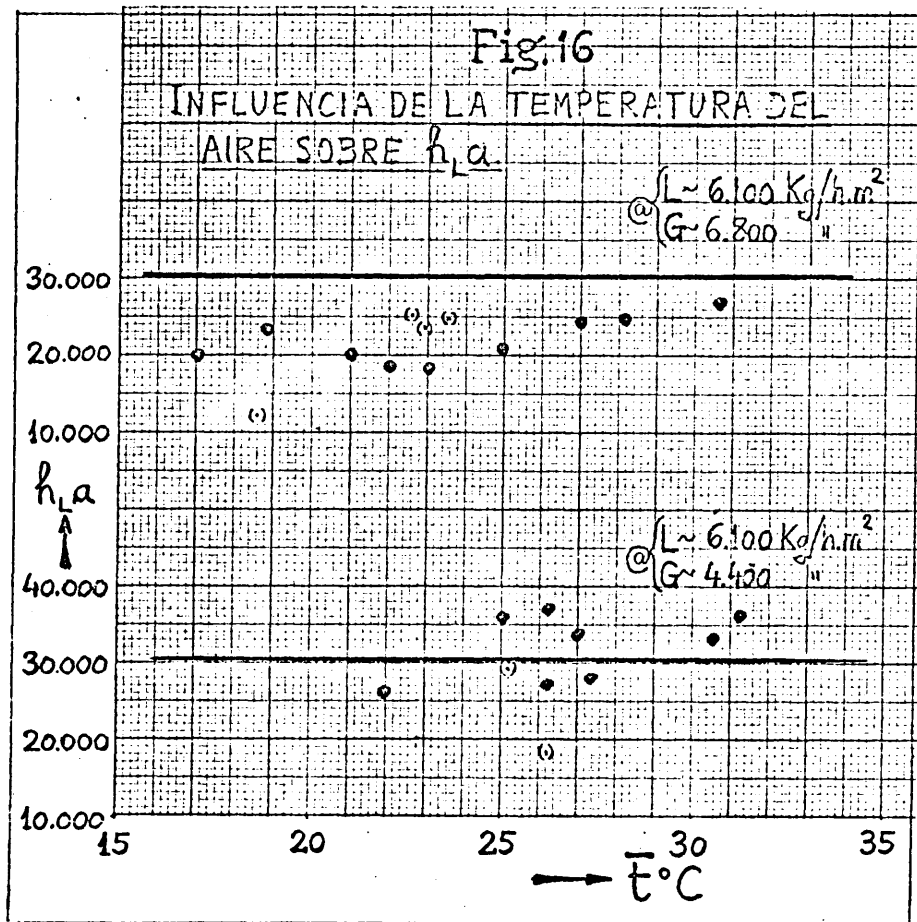
No se reflejó la influencia de las condiciones del aire sobre el coeficiente individual volumétrico de transmisión de calor a través de la fase gaseosa h_{ga} por ser éste proporcional a $k'a$ según la relación de Lewis.

VI-2.2.

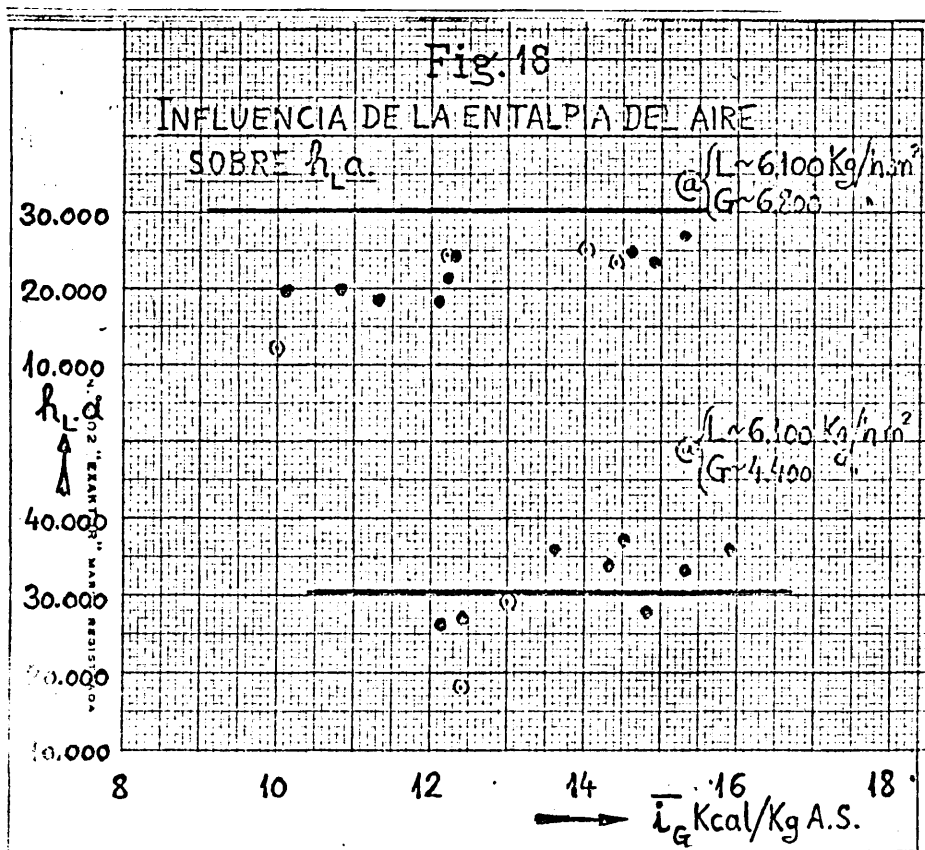
Influencia de las condiciones del aire sobre h_{la} .

En las Figuras 16, 17 y 18 se han representado los valores del coeficiente individual volumétrico de transmisión de calor a través de la fase líquida, h_{la} frente a los valores medios de la temperatura, humedad absoluta y entalpía del aire, \bar{T} , \bar{x} e \bar{I}_G respectivamente, correspondientes a las dos series de experimentos realizados.

Se observa que existe una desviación sistemática de resultados en la serie de experimentos realizada a caudal de aire alto ($G = 6.800 \text{ Kg/h.m}^2$), respecto al valor de h_{la} deducido en función de las variables principales de operación G y L . La desviación es debida a la pulverización del agua que



se produce con este tipo de relleno a velocidades másicas del aire superiores a 6.100 Kg/h.m^2 . (Este fenómeno se discute al tratar de la influencia de las variables principales G y L so-



bre los coeficientes). Sin embargo el 80 % de los valores de $h_{L,a}$ en esta serie están todavía dentro de $\pm 33 \%$ el valor deducido en función de las variables principales, aunque des-

plazados en una sola dirección.

Para la serie de caudal de aire normal ($G = 4.400$ Kg/h.m².) el 90 % de los valores de h_{La} están comprendidos dentro de ± 20 % del valor deducido en función de las variables principales G y L .

Por tanto, aunque pudiera observarse en primera aproximación cierta influencia de las condiciones del aire sobre h_{La} , la dispersión de los resultados y el hecho de que el error experimental con que se obtiene h a sea de ± 33 %, permiten concluir a la vista de los datos experimentales examinados, que las condiciones del aire estadísticamente no influyen sobre h_{La} .

VI-3.

Influencia de las variables principales, G y L , sobre los coeficientes volumétricos individuales de transporte.

Las variables que más influyen en el valor de los coeficientes volumétricos individuales son las velocidades másicas del aire y del agua, razón por la que las denominamos variables principales. No conviene olvidar aquí que, además, es sobre estas variables que el diseñador puede jugar a voluntad, mientras que las condiciones del aire o la temperatura del agua fluctuarán durante la operación de la

torre y le vienen por tanto impuestas, generalmente como condiciones extremas.

Tomando un margen de seguridad en el volumen de relleno necesario calculado en función de las condiciones de las velocidades máxicas del aire y el agua, se absorberán las posibles influencias de las variables secundarias que, como hemos visto hasta aquí no muestran claramente una tendencia a influir en el valor de los coeficientes individuales, dentro de ciertos límites estadísticos de errores.

Se realizaron 65 experimentos con objeto de disponer de datos suficientes para deducir estadísticamente la influencia de las variables principales L y G sobre los tres coeficientes volumétricos individuales: experimentos 1 al 65. Estos 65 experimentos, con los 22 realizados para estudiar la influencia de las condiciones del aire y los 15 de la temperatura del agua hacen un total de 102 experimentos útiles para estudiar la influencia de las variables principales.

Los experimentos se llevaron a cabo sistemáticamente hasta completar 5 series de 9 experimentos como mínimo cada una. Cada serie se realizó a un caudal de mojado determinado, cubriendo toda la gama de caudales de aire utilizados en la práctica en las torres de enfriamiento de agua de tiro forzado y flujo vertical, comprendidos entre $G = 3.400$

y $G = 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$. La gama de caudales de mojado estaba comprendida entre $L = 3.000$ y $L = 10.000 \text{ Kg/h.m}^2$. aproximadamente.

Las Tablas XVIII á XXII resumen los resultados obtenidos en las cinco series de experimentos para estudiar la influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes. De la misma manera, en las Tablas XXIII á XXXI se resumen los resultados experimentales agrupados en nueve series de cinco experimentos para estudiar la influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes. En esta Tablas se refleja además el valor de $k'a$ corregido que es el que corresponde al valor medio común de L ó G respectivamente en cada serie. No se han corregido los valores de h_{Ga} por ser proporcionales a los de $k'a$ según la relación de Lewis, ni los de h_{La} por tener ya de origen un error sistemático relativo alto y carecer de sentido su corrección en esas circunstancias.

La corrección al valor medio común se realizó por aproximaciones sucesivas después de determinar aproximadamente la forma de las ecuaciones de influencia y ajustando luego las series al valor medio común de L y G en cada una.

TABLA XVIII - Influencia de la velocidad másica
del aire sobre los tres coefi-
cientes, a $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
1	2.900	3.380	11.100	11.200	2.740	15.600
2	3.000	3.980	14.000	14.000	3.450	16.100
3	3.100	4.430	14.100	14.000	3.470	14.800
4	2.850	5.020	15.900	16.000	3.900	15.900
5	3.050	5.680	18.100	18.100	4.460	20.300
6	3.050	6.110	19.100	19.100	4.700	17.800
7	2.900	6.580	19.000	19.100	4.670	15.800
8	2.960	7.380	27.200	27.300	6.670	13.800
9	3.000	7.970	34.100	34.100	8.350	14.000

TABLA XIX - Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$.

1	28	29	34	k'a	35	36
Nº	L	G	k'a	corr.	h_{Ga}	h_{La}
10	4.300	3.290	11.600	11.600	2.880	20.600
11	4.250	4.020	14.400	14.500	3.560	23.400
12	4.375	4.375	13.900	13.800	3.420	21.600
13	4.475	5.030	16.100	16.000	3.950	25.300
14	4.190	5.510	16.700	16.800	4.100	22.500
15	4.190	5.510	16.900	17.000	4.140	21.300
16	4.190	5.530	16.700	16.800	4.110	21.100
17	4.300	5.990	18.400	18.400	4.500	20.400
18	4.210	6.590	20.700	20.800	5.090	18.400
19	4.300	7.270	28.500	28.500	7.000	16.200
20	4.185	7.950	38.100	38.900	9.340	15.800
79	4.190	4.225	12.200	12.300	3.000	18.200
81	4.080	7.125	25.600	25.900	6.290	12.300
86	4.360	5.425	17.500	17.500	4.315	26.600
87	4.300	5.610	17.200	17.200	4.240	22.700
88	4.360	5.490	19.400	19.400	4.810	20.500

... / ...

TABLA XIX - (Continuación)

... / ...

89	4.240	5.470	17.600	17.600	4.350	25.800
90	4.220	5.345	17.200	17.300	4.250	27.800
91	4.135	5.420	18.900	19.100	4.705	25.500
108	4.385	4.250	15.500	15.500	3.700	27.000
109	4.385	6.745	26.600	26.600	6.600	18.000
97	4.515	4.430	17.000	16.900	4.210	24.100
98	4.310	6.880	28.800	28.800	7.120	19.100

TABLA XX - Influencia de la velocidad másica
del aire sobre los tres coeficien-
tes, a $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
21	6.110	3.420	13.000	13.000	3.230	26.200
22	6.090	3.955	14.400	14.400	3.570	32.200
23	6.110	4.320	13.800	13.800	3.390	27.300
24	6.275	4.900	18.300	18.200	4.535	32.500
25	6.125	5.720	19.800	19.800	4.860	27.300
26	6.575	6.120	20.400	20.100	5.025	26.600
27	6.050	6.750	22.000	22.000	5.400	24.400
28	6.125	7.350	31.800	31.800	7.810	22.100
29	6.010	7.800	38.400	38.500	9.450	19.300
30	6.110	7.500	34.900	34.900	8.580	20.500
64	6.110	5.530	15.600	15.600	3.840	25.000
65	6.160	5.480	19.700	19.600	4.880	30.100
67	6.000	4.450	16.100	16.200	3.960	26.300
68	6.100	4.390	15.000	15.000	3.690	35.800
69	6.090	4.420	14.500	14.500	3.590	28.200
70	6.060	4.350	12.800	12.800	3.160	37.200
71	6.090	4.330	15.000	15.000	3.720	36.200

... / ...

TABLA XX - (Continuación)

... / ...

72	5.735	6.860	24.400	24.700	6.000	23.400
73	6.000	6.940	30.000	30.100	7.360	20.000
74	6.020	6.860	26.600	26.600	6.540	18.600
75	6.090	6.840	29.000	29.000	7.140	18.400
76	6.040	6.860	27.700	27.700	6.800	21.200
77	6.090	6.570	25.500	25.500	6.310	24.800
78	6.110	6.650	24.400	24.400	6.040	27.000
101	6.040	6.870	26.100	26.100	6.420	19.700
102	6.090	4.440	14.900	14.900	3.680	33.700
103	6.090	4.330	14.900	14.900	3.690	33.300

TABLA XXI - Influencia de la velocidad másica del
aire sobre los tres coeficientes,
a $L = 8.100 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
31	8.080	3.160	12.500	12.500	3.070	33.800
32	8.060	3.870	13.800	13.800	3.400	33.800
33	8.080	4.410	14.400	14.400	3.540	39.700
34	8.050	5.020	19.100	19.200	4.710	31.300
35	8.080	5.450	17.200	17.200	4.250	44.600
36	8.080	5.480	16.700	16.700	4.110	40.200
37	8.040	6.020	21.500	21.600	5.300	44.300
38	8.125	6.020	24.500	24.500	6.080	37.700
39	8.125	6.040	23.800	23.800	5.900	36.100
40	8.265	6.050	22.900	22.700	5.660	46.100
41	8.075	6.230	24.000	24.000	5.920	32.900
42	7.920	6.690	29.300	29.500	7.240	30.800
43	7.930	6.530	25.100	25.300	6.210	28.300
44	7.920	6.550	26.700	26.900	6.550	32.100
45	7.870	7.120	32.200	32.500	7.930	24.000
46	7.820	7.075	30.300	30.600	7.440	29.100
47	8.125	7.550	37.800	37.800	9.340	28.600
62	8.125	6.425	29.000	29.000	7.115	25.000
63	8.180	6.550	25.000	25.000	6.250	32.100

TABLA XXI - (Continuación)

... / ...

80	8.075	4.310	17.000	17.000	4.180	29.100
82	8.025	6.780	33.300	33.400	8.240	23.100
83	8.025	6.820	32.300	32.400	8.000	24.200
84	8.010	6.790	32.800	32.900	8.100	25.100
85	8.025	6.850	30.400	30.500	7.470	24.600
92	8.010	5.550	20.500	20.600	5.050	40.500
93	8.010	5.510	18.100	18.200	4.465	35.800
94	7.910	5.550	17.000	17.200	4.190	41.200
95	8.000	5.490	20.500	20.600	5.100	34.500
96	8.000	5.520	17.100	17.200	4.250	44.500
99	8.075	4.420	15.200	15.200	3.750	43.100
100	8.040	6.800	31.100	31.100	7.730	28.400
110	8.075	4.460	16.900	16.900	4.200	40.000

TABLA XXII - Influencia de la velocidad másica
del aire sobre los tres coeficien-
tes, a $L = 10.100 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
[48	10.130	3.930	14.600	14.600	3.590	54.000
49	10.130	3.920	14.700	14.700	3.610	57.900
50	10.030	3.930	15.800	15.900	3.900	42.200
51	10.050	4.370	15.300	15.400	3.800	51.700
[52	10.080	4.900	17.600	17.600	4.360	67.500
53	10.080	4.920	17.100	17.100	4.180	66.000
[54	10.080	4.920	16.900	16.900	3.965	65.300
55	10.070	5.510	18.700	18.700	4.630	57.500
56	10.020	6.090	24.500	24.600	6.025	43.400
57	10.000	6.260	28.100	28.200	6.910	31.000
[58	10.070	6.540	29.700	29.700	7.330	38.200
[59	10.070	6.580	33.400	33.400	8.280	44.100
60	10.080	7.125	38.000	38.000	9.350	39.800
61	10.100	7.610	41.800	41.800	10.300	38.300

TABLA XXIII - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 3.400 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
1	2.900	3.380	11.100	11.200	2.740	15.600
10	4.300	3.290	11.600	11.800	2.880	20.600
21	6.110	3.420	13.000	12.900	3.230	26.200
31	8.080	3.160	12.500	13.200	3.070	33.800

TABLA XXIV - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 4.000 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _{Ga}	36 h _{La}
2	3.000	3.986	14.000	14.100	3.450	16.100
11	4.250	4.020	14.400	14.400	3.560	23.400
22	6.090	3.955	14.400	14.500	3.570	32.200
32	8.060	3.870	13.800	14.200	3.400	33.800
48	10.130	3.930	14.600	14.900	3.590	54.000
49	10.130	3.920	14.700	15.000	3.610	57.900
50	10.030	3.930	15.800	16.000	3.900	42.200

TABLA XXV - Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _{ga}	36 h _{La}
3	3.100	4.430	14.100	14.000	3.470	14.800
12	4.375	4.375	13.900	14.000	3.420	21.600
79	4.190	4.225	12.200	12.600	3.000	18.200
108	4.385	4.250	15.500	16.000	3.700	27.000
23	6.110	4.320	13.800	14.000	3.390	27.300
67	6.000	4.450	16.100	15.900	3.960	26.300
68	6.100	4.390	15.000	15.000	3.690	35.800
69	6.090	4.420	14.500	14.500	3.590	28.200
70	6.060	4.350	12.800	12.900	3.160	37.200
71	6.090	4.330	15.000	15.300	3.720	36.000
102	6.090	4.440	14.900	14.800	3.680	33.700
103	6.090	4.330	14.900	15.100	3.690	33.300
33	8.080	4.410	14.400	14.400	3.540	39.700
80	8.075	4.310	17.000	17.200	4.180	29.100
97	4.515	4.430	17.000	16.900	4.210	24.100
99	8.075	4.420	15.200	15.200	3.750	43.100
110	8.075	4.460	16.900	16.700	4.200	40.000
51	10.050	4.370	15.300	15.400	3.800	51.700

TABLA XXVI - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 5.000 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
4	2.850	5.020	15.900	15.800	3.900	15.900
13	4.475	5.030	16.100	16.000	3.950	25.300
24	6.275	4.900	18.300	18.700	4.535	32.500
34	8.050	5.020	19.100	19.000	4.710	31.300
52	10.080	4.900	17.600	18.000	4.360	67.500
53	10.080	4.920	17.100	17.400	4.180	66.000
54	10.080	4.920	16.900	17.200	3.965	65.300

TABLA XXVII - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _{ga}	36 h _{La}
5	3.050	5.680	18.100	17.600	4.460	20.300
14	4.190	5.510	16.700	16.700	4.100	22.500
15	4.190	5.510	16.900	16.900	4.140	21.300
16	4.190	5.530	16.700	16.500	4.110	21.100
86	4.360	5.425	17.500	17.700	4.315	26.600
87	4.300	5.610	17.200	16.800	4.240	22.700
88	4.360	5.490	19.400	19.400	4.810	20.500
89	4.240	5.470	17.600	17.700	4.350	25.800
90	4.220	5.345	17.200	17.700	4.250	27.800
91	4.135	5.420	18.900	18.900	4.705	25.500
25	6.125	5.720	19.800	18.900	4.860	27.300
64	6.110	5.530	15.600	15.500	3.840	25.000
65	6.160	5.480	19.700	19.800	4.880	30.100
35	8.080	5.450	17.200	17.500	4.250	44.600
36	8.080	5.480	16.700	16.800	4.110	40.200
92	8.010	5.550	20.500	20.300	5.050	40.500
93	8.010	5.510	18.100	18.100	4.465	35.800
94	7.910	5.550	17.000	16.800	4.190	41.200
95	8.000	5.490	10.500	20.500	5.100	34.500
96	8.000	5.520	17.100	17.000	4.250	44.500
55	10.070	5.510	18.700	18.700	4.630	57.500

TABLA XXVIII - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _{ga}	36 h _{La}
6	3.050	6.110	19.100	19.100	4.700	17.800
17	4.300	5.990	18.400	18.800	4.500	20.400
26	6.575	6.120	20.400	20.300	5.025	26.600
37	8.040	6.020	21.500	21.900	5.300	44.300
38	8.125	6.020	24.500	24.800	6.080	37.700
39	8.125	6.040	23.800	24.000	5.900	36.100
40	8.265	6.050	22.900	23.100	5.660	46.100
41	8.075	6.230	24.000	23.300	5.920	32.900
56	10.020	6.090	24.500	24.500	6.025	43.400
57	10.000	6.260	28.100	27.100	6.910	31.000

TABLA XXIX - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G = 6.600 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
7	2.900	6.580	19.000	19.100	4.670	15.800
18	4.210	6.590	20.700	20.700	5.090	18.400
109	4.385	6.745	26.600	25.800	6.600	18.000
27	6.050	6.750	22.000	21.300	5.400	24.400
72	5.735	6.860	24.400	23.200	6.000	23.400
73	6.000	6.940	30.000	27.700	7.360	20.000
74	6.020	6.860	26.600	25.100	6.540	18.600
75	6.090	6.840	29.000	27.400	7.140	18.400
76	6.040	6.860	27.700	25.800	6.800	21.200
77	6.090	6.570	25.500	25.700	6.310	24.800
78	6.110	6.650	24.400	24.200	6.040	27.000
101	6.040	6.870	26.100	24.300	6.420	19.700
42	7.920	6.690	29.300	28.800	7.240	30.800
43	7.930	6.530	25.100	25.600	6.210	28.300
44	7.920	6.550	26.700	27.000	6.550	32.100
62	8.125	6.425	29.000	30.200	7.115	25.000
63	8.180	6.550	25.000	24.700	6.250	32.100
82	8.025	6.780	33.300	31.700	8.240	23.100
83	8.025	6.820	32.300	30.700	8.000	24.200
84	8.010	6.790	32.800	31.200	8.100	25.100

... / ...

TABLA XXIX - (Continuación)

... / ...

85	8.025	6.850	30.400	28.700	7.470	24.600
100	8.040	6.800	31.100	29.500	7.730	28.400
[58	10.070	6.540	29.700	30.000	7.330	38.200
[59	10.070	6.580	33.400	33.500	8.280	44.100
98	4.310	6.880	28.800	26.800	7.120	19.100

TABLA XXX - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G \simeq 7.300 \text{ Kg/h.m}^2$.

1 Nº	28 L	29 G	34 k'a	k'a corr.	35 h _G a	36 h _L a
8	2.960	7.380	27.200	26.700	6.670	13.800
19	4.300	7.270	28.500	28.600	7.000	16.200
81	4.080	7.125	25.600	27.000	6.290	12.300
28	6.125	7.350	31.800	31.300	7.810	22.100
30	6.110	7.500	34.900	33.000	8.580	20.500
45	7.870	7.120	32.200	34.000	7.930	24.000
46	7.820	7.075	30.300	32.800	7.440	29.100
60	10.080	7.125	38.000	40.000	9.350	39.800

TABLA XXXI - Influencia de la velocidad másica
del agua sobre los tres coeficien-
tes, a $G \simeq 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$.

1	28	29	34	k'a	35	36
Nº	L	G	k'a	corr.	h _G a	h _L a
9	3.000	7.970	34.100	32.500	8.350	14.000
20	4.185	7.950	38.100	36.500	9.340	15.800
29	6.010	7.800	38.400	38.400	9.450	19.300
47	8.125	7.550	37.800	40.500	9.340	28.600
61	10.100	7.610	41.800	44.000	10.300	38.300

VI-3.1.

Planteamiento de la discusión de los resultados.

El procedimiento seguido para analizar los resultados experimentales y estudiar la influencia de las variables principales sobre los tres coeficientes volumétricos individuales fué desarrollado en tres etapas:

En primer lugar se representaron gráficamente y en papel milimetrado normal los valores de $k'a$, h_{Ga} y h_{La} obtenidos experimentalmente frente a los correspondientes de L y G para cada experimento. Se puso observar entonces que:

1º). Existía una correspondencia de proporcionalidad directa entre los valores de $k'a$ y los de h_{Ga} , según la relación de Lewis, ya que las diferencias en el calor específico del aire húmedo entre unos experimentos y otros eran como máximo del 1,5 %, valor muy inferior al error experimental de ± 10 % con que se obtienen tanto $k'a$ como h_{Ga} . Por tanto esto limitaba el estudio de los coeficientes individuales de transporte en la fase gaseosa a $k'a$.

2º). Se apreciaba una influencia clara, no lineal de la velocidad másica del aire, G , y de la velocidad másica del agua, L , sobre $k'a$, así como de la velocidad másica del agua, L , sobre h_{La} . La dispersión de valores era pequeña aunque proporcionalmente más acusada en el caso de h_{La} , y

permitía prever la posibilidad de buena correlación mediante alguna forma de ecuación empírica.

3º). Era grande la dispersión de los resultados al estudiar la influencia de la velocidad másica del aire, G , sobre h_{La} y se apreciaban dos zonas de influencia: una primera zona, que abarcaba valores de G inferiores a unos 6.500 Kg/h.m², en la que la velocidad másica del aire no influía sobre h_{La} , y una segunda zona, para valores superiores a $G = 6.500$ Kg/h.m², en la que se apreciaba una influencia de carácter recesivo de G sobre h_{La} . En esta segunda zona se había observado precisamente pulverización creciente del agua por acción de la velocidad del aire, con la consiguiente recirculación de abundantes gotas de agua en el interior de la torre; a valores de G inferiores al valor crítico de $G = 6.500$ Kg/h.m². no se producía recirculación de gotas. Esta observación dió origen a prever la posibilidad de tener que considerar dos categorías de experimentos: experimentos normales en los que no se había producido pulverización ni recirculación del agua y experimentos marginales en los que de una forma más o menos pronunciada sí se había observado este fenómeno.

Una vez hechas las anteriores observaciones, se procedió a estudiar la forma de expresión empírica que con mayor exactitud permitiría representar la influencia de G y L

sobre $k'a$ y h_La , llegándose a la conclusión de que, en escala semilogarítmica, y considerando todos los resultados experimentales, los valores de $k'a$ frente a G y L y de h_La frente a L se representaban estadísticamente con la mejor aplicación. Las ecuaciones correspondientes a cada coeficiente en función de G y L se dedujeron siguiendo un procedimiento gráfico y después de representar en escala semilogarítmica los valores de $k'a$ y h_La frente a G y L respectivamente.

En el caso de $k'a$, que presentaba poca dispersión de resultados y éstos se obtienen con un error sistemático bajo ($\pm 10\%$), se dedujo gráficamente una ecuación de $k'a$ frente a G para cada una de las cinco series de experimentos a L constante. Esto se hizo teniendo en cuenta la importancia relativa de cada resultado individual dentro de cada serie de experimentos a base de dar a cada punto, al aplicar el método de mínimos cuadrados, un valor inversamente proporcional al error relativo con que se obtenía $k'a$ por el Método de Mickley, mediante el ordenador IBM-1620. Así se obtuvo para cada serie la mejor recta representativa de los datos experimentales de $k'a$ frente a G en la escala semilogarítmica. Con las cinco ecuaciones de $k'a$ en función de G a L constante así deducidas, se obtuvo entonces la ecuación general para $k'a$ en función de las variables principales.

Los valores experimentales de h_{La} frente a L presentaban en papel semilogarítmico una mayor dispersión, lo que, unido al error relativo alto ($\pm 33\%$) con que se obtenía el coeficiente h_{La} , no permitía utilizar un método matemático para deducir la forma de las ecuaciones representativas, deduciéndose de forma empírica las ecuaciones de h_{La} en función de L para cada una de las nueve series de experimentos a G constante. Con esas nueve ecuaciones se obtuvo entonces la ecuación general de h_{La} en función de las variables principales.

Como última etapa de este estudio crítico de los resultados experimentales, teniendo en cuenta las observaciones hechas en las dos etapas anteriores y el hecho de que en la bibliografía se representan los coeficientes de transporte como funciones potenciales de las velocidades máxicas de gas y líquido, se procedió a estudiar las expresiones empíricas que representarían la influencia de G y L sobre $k'a$ y h_{La} en ecuaciones del tipo general indicado. Para ello se representaron gráficamente en escala doble logarítmica los valores de $k'a$ corregidos y de h_{La} frente a G y L respectivamente en cada serie de experimentos, deduciéndose ecuaciones generales para ambos coeficientes, válidas para los experimentos "normales" realizados a velocidades máxicas del aire inferiores a $G = 6.500 \text{ Kg/h.m}^2$. Los experimentos realizados a valores de G superiores a

6.500 Kg/h.m², se apartaban progresivamente de las ecuaciones generales deducidas con los experimentos "normales", por lo que resultaban ser experimentos "marginales".

A continuación se discute en detalle la forma en que se estudió sistemáticamente la influencia de las variables principales sobre los coeficientes individuales de transporte $k'a$ y h_La .

VI-3.2.

Influencia de las velocidades másicas de aire y agua sobre el coeficiente volumétrico individual de transferencia de materia a través de la fase gaseosa, $k'a$.

Las Tablas XVIII a XXII resumen los resultados de las cinco series de experimentos realizadas para estudiar la influencia de G y L sobre los coeficientes de transporte. Cada serie se llevó a cabo a una determinada velocidad másica de agua, L , mantenida aproximadamente constante en todos los experimentos de la misma serie. Estas se realizaron a los siguientes valores de la velocidad másica del agua, $L = 3.000, 4.300, 6.100, 8.100$ y 10.100 Kg/h.m², variando en cada serie los valores de la velocidad másica del aire, G , entre 3.400 y 7.800 Kg/h.m².

VI-3.2.1.

Análisis de los resultados en escala semilogarítmica.

Para deducir la influencia de G y L sobre el coeficiente individual volumétrico de transferencia de materia en la fase gaseosa $k'a$ se representaron en escala semilogarítmica (Figuras 37-bis á 41-bis) los valores de $k'a$ frente a G de cada una de las series de experimentos a L fija. Se tuvo en cuenta la importancia estadística relativa de cada

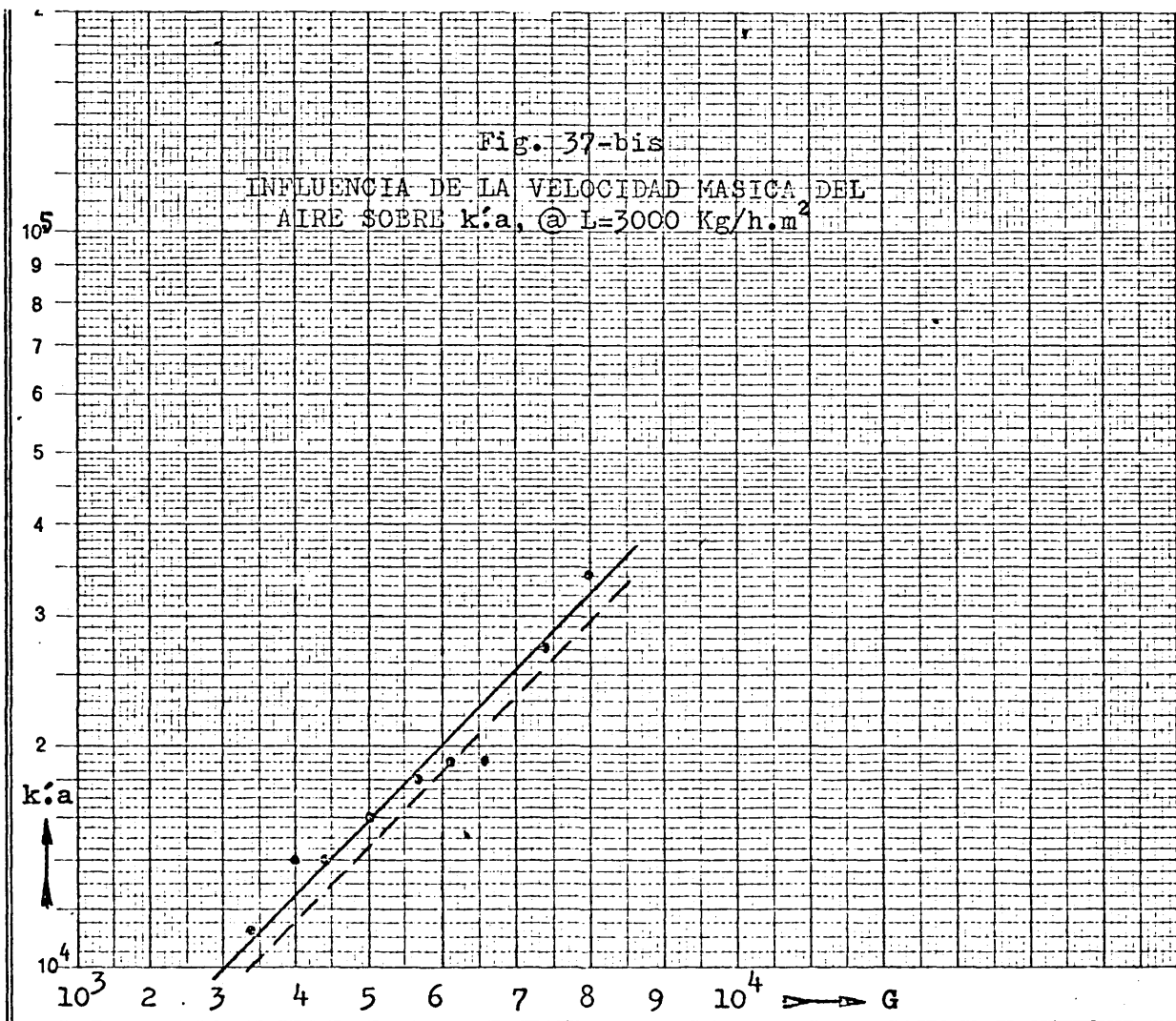


Fig. 38-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AIRE SOBRE $k'a$, @ $L=4300 \text{ Kg/h.m}^2$

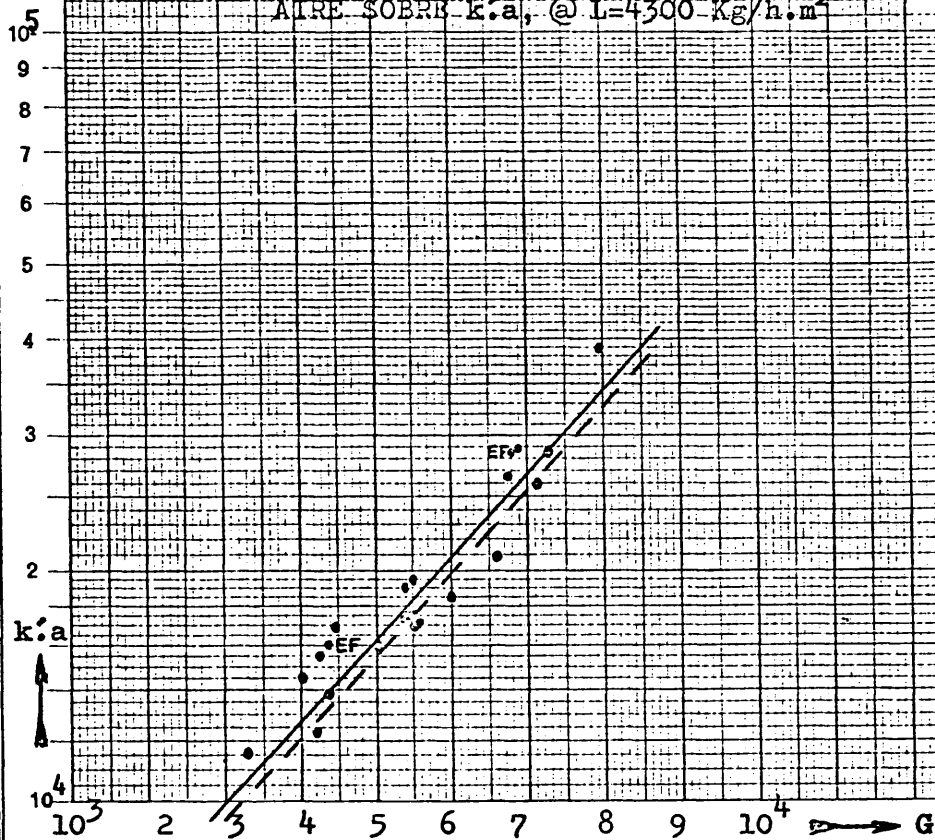


Fig. 39-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AIRE SOBRE $k'a$, @ $L=6100 \text{ Kg/h.m}^2$

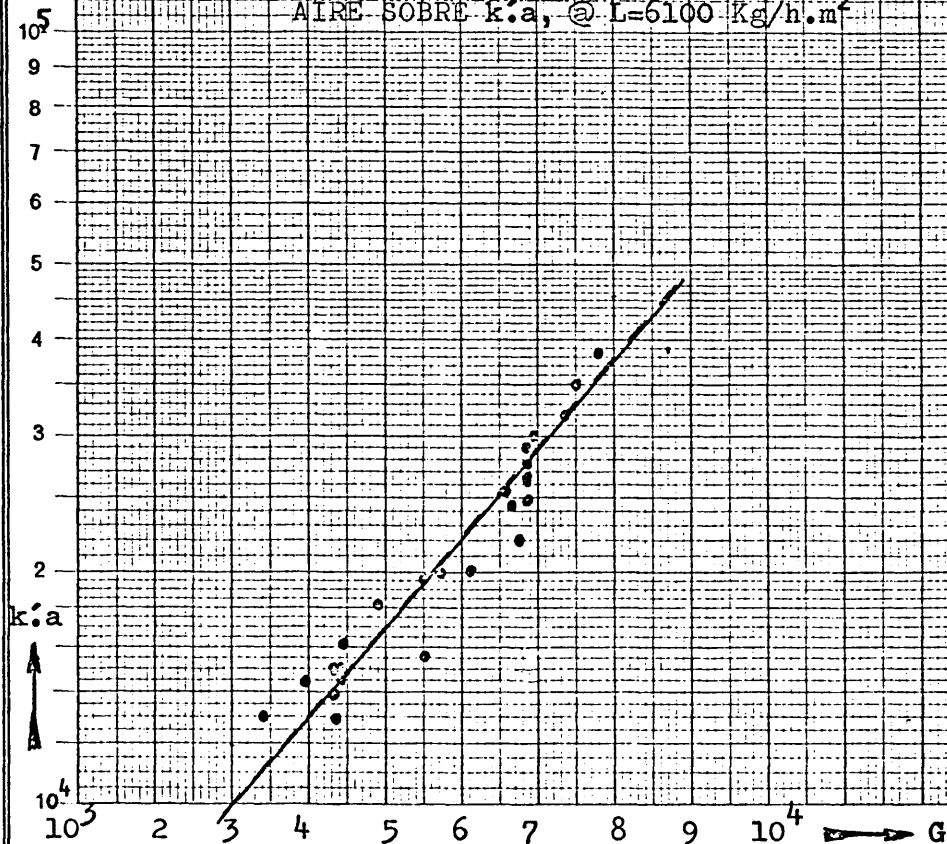


Fig.40-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AIRE SOBRE $k'a$, @ $L=8100 \text{ Kg/h.m}^2$

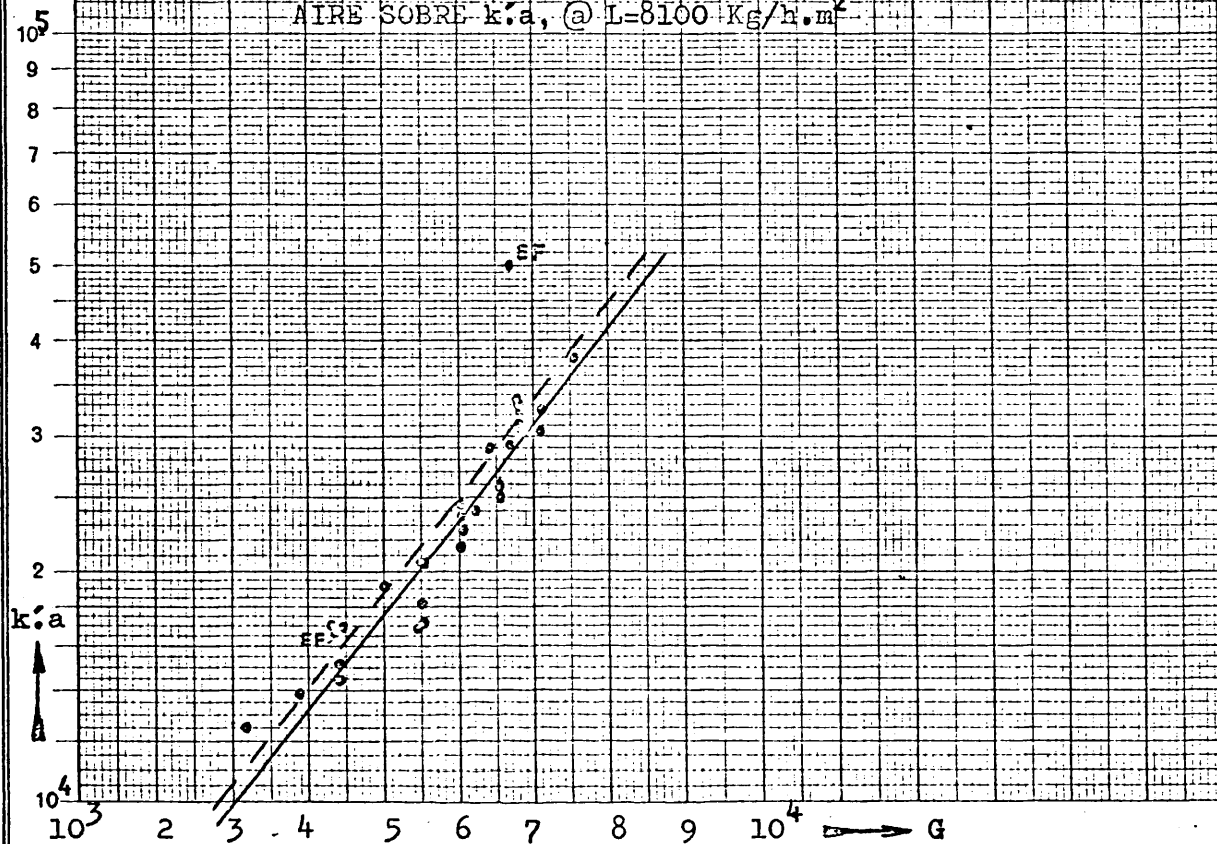
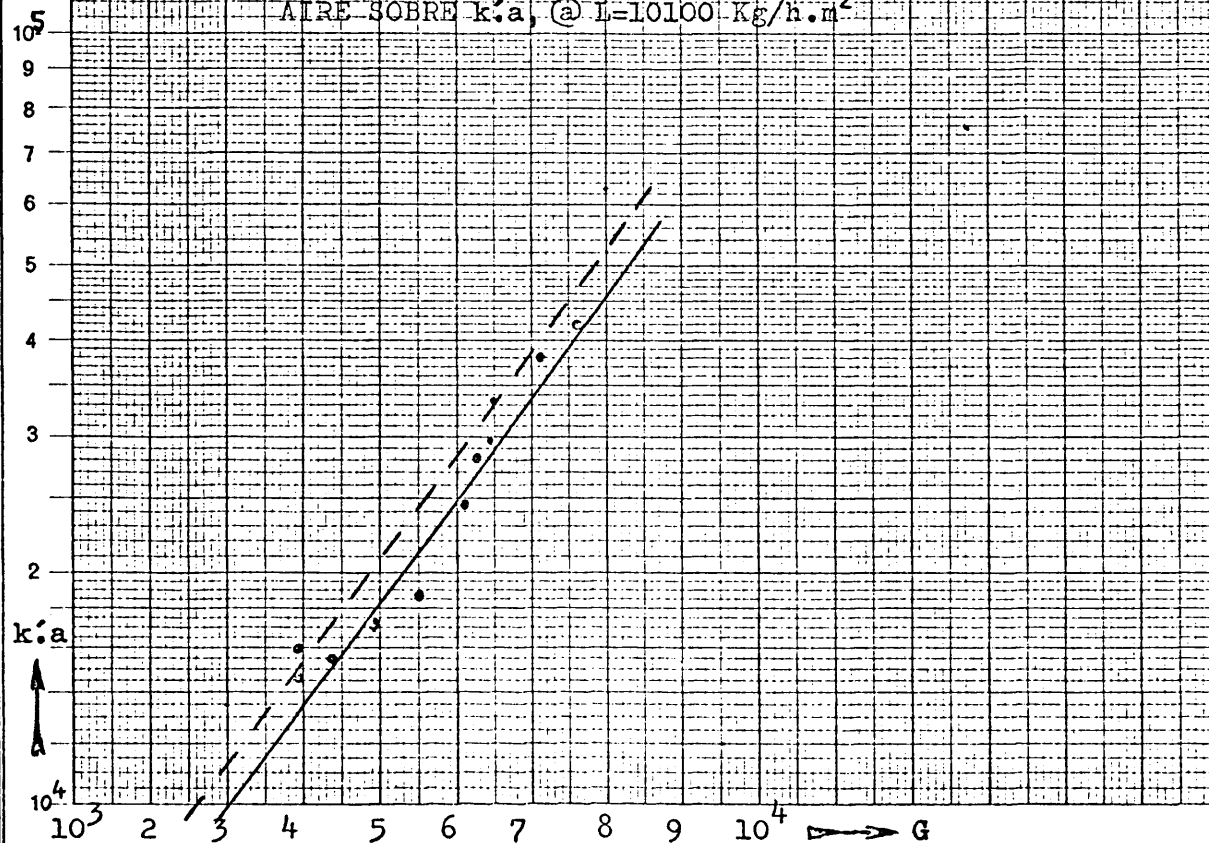


Fig. 41-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AIRE SOBRE $k'a$, @ $L=10100 \text{ Kg/h.m}^2$



punto de la serie dando a cada valor experimental una importancia inversamente proporcional al error relativo con que se obtenían los coeficientes individuales y que es uno de los datos suministrados por el ordenador electrónico para un valor de la temperatura del aire a la salida de la torre comprendido entre $t_2 - 0,05^{\circ}\text{C} < t_2 < t_2 + 0,05^{\circ}\text{C}$.

Aplicando gráfica y numéricamente el método de los mínimos cuadrados a los puntos "ponderados" de cada serie de valores de $k'a$ frente a G se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Para $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (9 experimentos. Figura 37-bis).

$$\log k'a = 3.70 + 0,982 \times 10^{-4} G \quad (50)$$

Para $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$. (21 experimentos. Figura 38-bis).

$$\log k'a = 3.64 + 1,117 \times 10^{-4} G \quad (51)$$

Para $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (27 experimentos. Figura 39-bis).

$$\log k'a = 3.64 + 1,158 \times 10^{-4} G \quad (52)$$

Para $L = 8.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (30 experimentos. Figura 40-bis).

$$\log k'a = 3.64 + 1.215 \times 10^{-4} G \quad (53)$$

Para $L = 10.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (14 experimentos. Figura 41-bis)

$$\log k'a = 3.60 + 1.360 \times 10^{-4} G \quad (54)$$

A título de ejemplo se detalla en el Apéndice el método de cálculo por mínimos cuadrados de puntos "ponderados" seguido para obtener la ecuación correspondiente a la serie de experimentos realizada a $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Figura 37-bis).

De estas cinco ecuaciones se dedujo una ecuación general que las reproduce con error menor de $\pm 1 \%$ y que tiene la forma siguiente (

$$\begin{aligned} \log k'a = & 3,73 - 0,135 \times 10^{-4} L + \\ & + (0,892 + 0,439 \times 10^{-4} L) 10^{-4} G \quad (55) \end{aligned}$$

En las Figuras 37-bis á 41-bis se representan con trazo continuo cada una de las ecuaciones (50), (51), (52), (53) y (54), que se corresponden con la ecuación general (55).

Sin embargo, la dispersión de los datos experimentales permitía utilizar una ecuación general más simple que reproduce las ecuaciones individuales encontradas con un error menor de $\pm 10 \%$.

Esta ecuación es la siguiente:

$$\log k'a = 3.65 + (0,892 + 0,439 \times 10^{-4}L)10^{-4}G \quad (56)$$

y su correspondencia con los datos experimentales se refleja en las Figuras 37-bis á 41-bis. por las rectas de trazos. La ecuación (56) es más "realista" para la dispersión que tienen los datos experimentales que la (55).

VI-3.2.2.

Análisis de los resultados en escala doble-logarítmica.

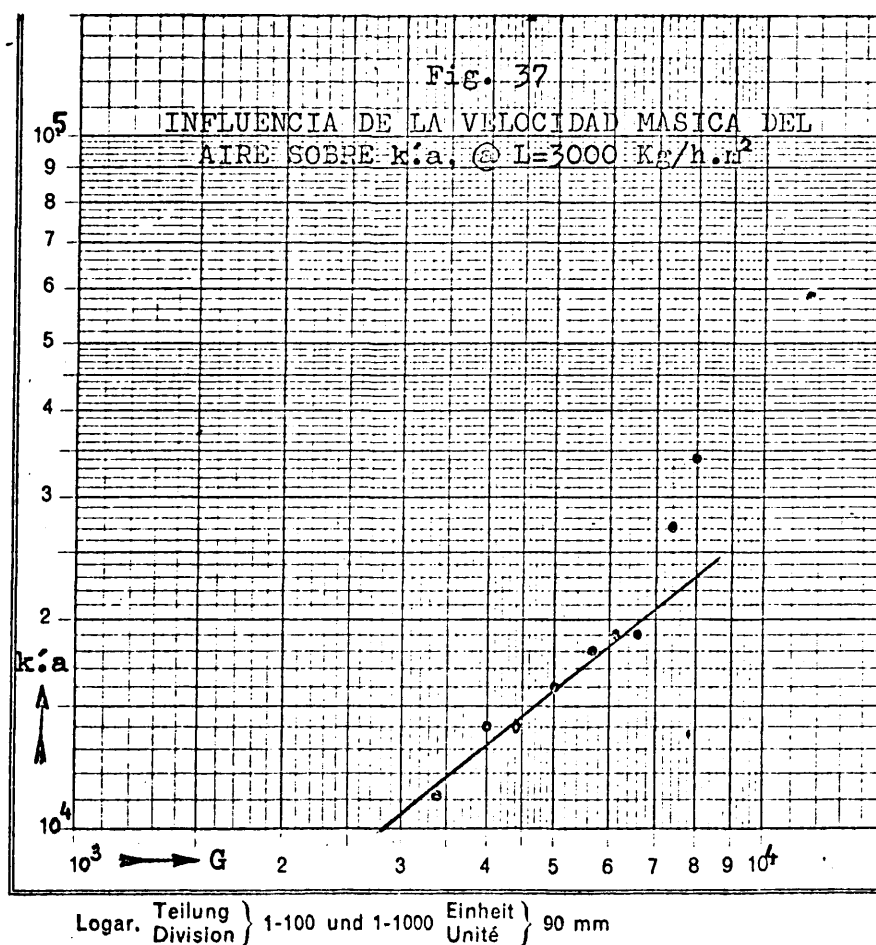
Aunque las ecuaciones (55) y (56) deducidas para $k'a$ en función de G y L reproducen con buena exactitud los resultados experimentales dentro de su dispersión, una observación detallada de las Figuras 37-bis á 41-bis muestra dos tendencias distintas de alineación de esos datos: una, para velocidades másicas del aire inferiores a $G = 6.500 \text{ Kg/h.m}^2$. y otra, para velocidades másicas del aire superiores a ese valor.

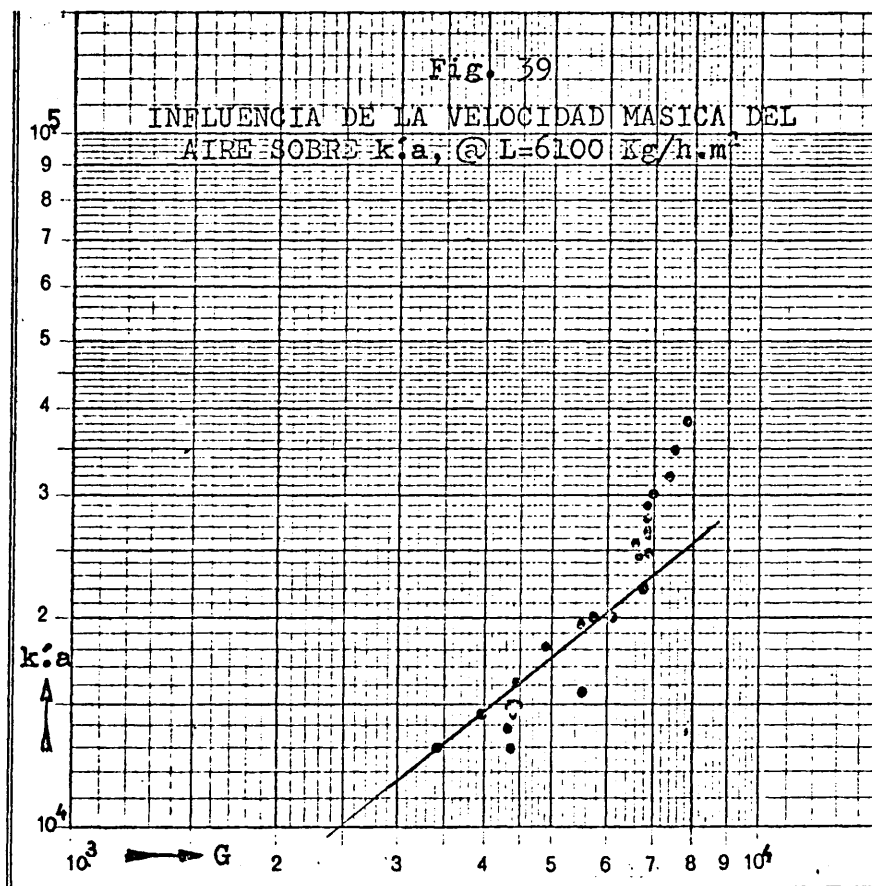
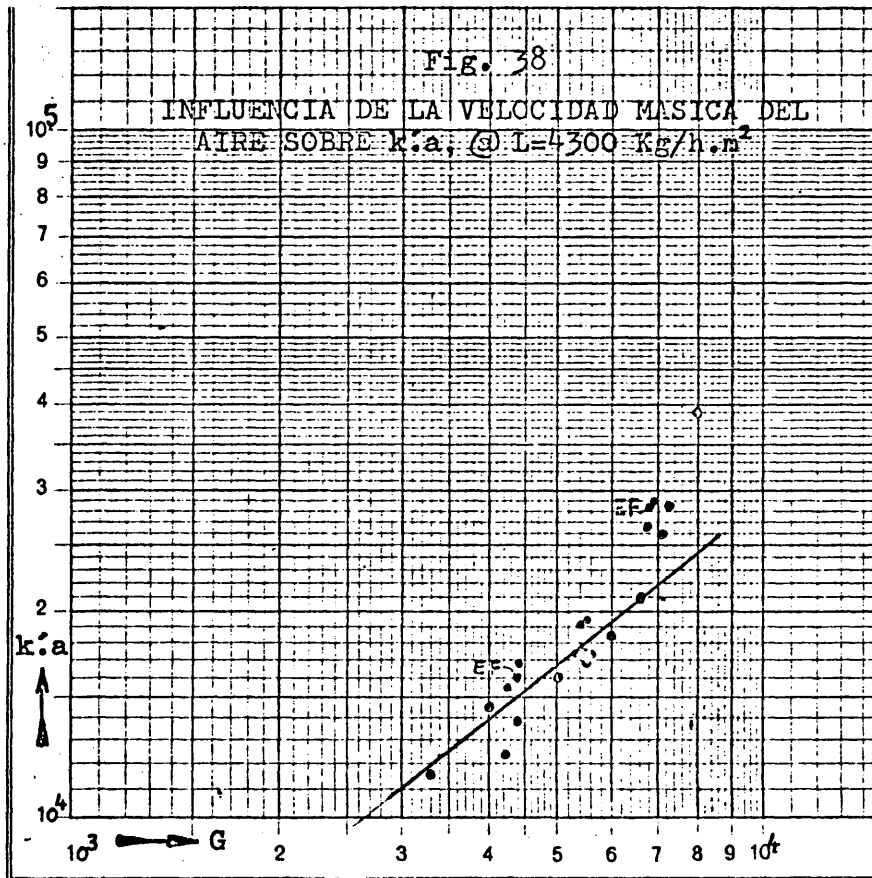
La influencia de G sobre $k'a$ era muy superior en la segunda zona a la que muestra en la zona normal en que no se había producido pulverización. Esta observación, unida a la conveniencia de comparar los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios previos análogos descri-

tos en la bibliografía, condujo a emprender un nuevo estudio sobre los experimentos "normales" para tratar de deducir una expresión más simple para $k'a$ y de la forma más comúnmente utilizada en la bibliografía:

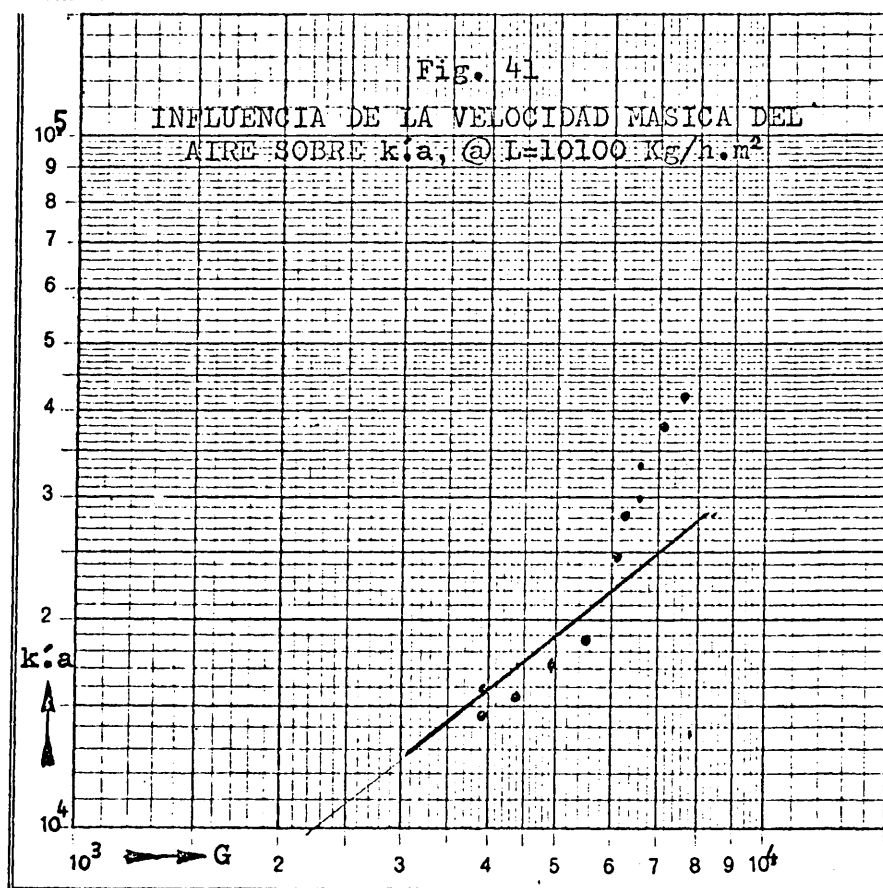
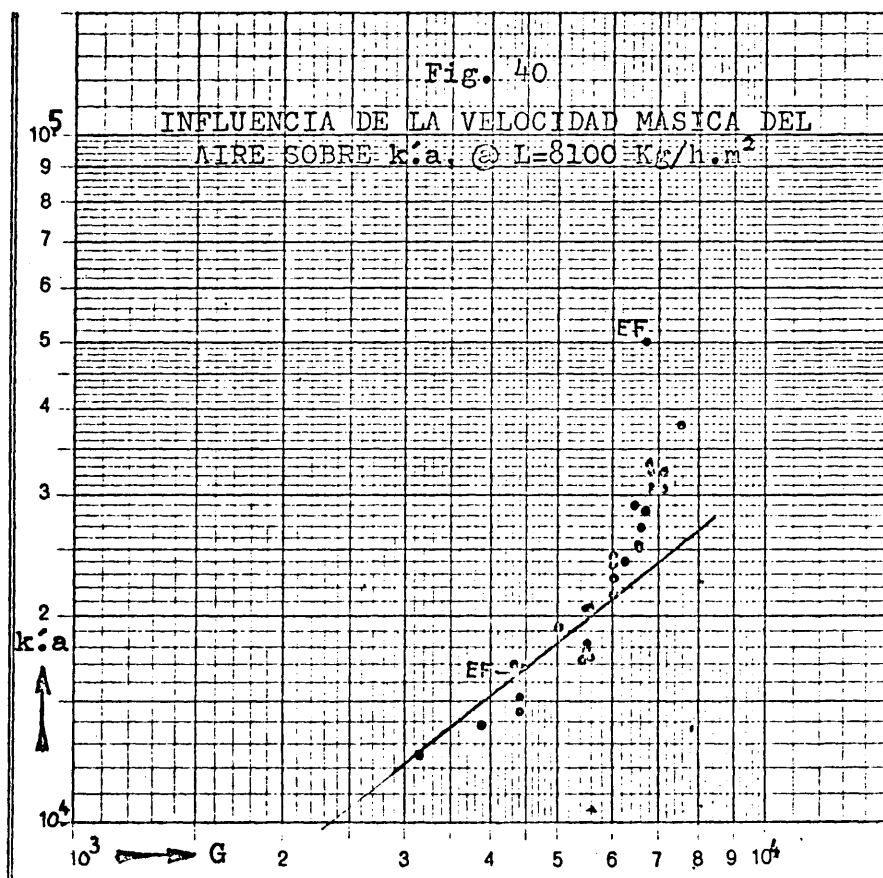
$$k'a = K \cdot G^m \cdot L^n$$

Las Figuras 37 á 41 representan para cada serie de





Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
Division } Unité }



Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
Division }

experimentos a L constante, los valores de $k'a$, corregidos por aproximaciones sucesivas al valor común de L en cada serie frente a los de G , en escala doble logarítmica; datos correspondientes a las Tablas XVIII á XXII. Para valores de G inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 , los puntos de cada serie se alinean a lo largo de rectas de pendiente 0.80. Este valor de la pendiente se dedujo después de ensayar gráficamente para cada serie de experimentos la forma de la recta que en esta escala doble logarítmica reproducía mejor todos los puntos experimentales, y obteniendo luego estadísticamente la mejor pendiente común a todas las rectas.

Para valores de G superiores a 6.500 Kg/h.m^2 , en que la pulverización causada por la excesiva velocidad del aire produce efectos secundarios, se aprecia claramente una discontinuidad en la norma de influencia aumentando mucho aparentemente la influencia de G sobre $k'a$ y alineándose los puntos sobre rectas de pendiente 2.5 aproximadamente. Como se observó después, este fenómeno coincide con una disminución aparente de la influencia de G sobre h_{La} . La formación y recirculación de gotas de agua, produce un gran aumento de la superficie y el tiempo de contacto aire-agua, con lo que deja entonces de ser apto el tratamiento por las ecuaciones generales de transporte si no se tiene en cuenta el gran aumento de superficie de contacto aire-agua por unidad de volumen de relleno y la recirculación de las go-

tas de agua con aumento del tiempo de contacto.

El que a valores de G inferiores al máximo normal de utilización práctica se produzca pulverización indica que el relleno ensayado es muy "denso" comparado con los que se usan en la industria, y por tanto la velocidad de paso del aire a través del mismo es más elevada de lo normal para una misma velocidad másica del aire. Este hecho se había previsto al elegir el relleno pero fué necesario utilizar en los ensayos un relleno denso para permitir el buen funcionamiento del colector de agua que evitara la aparición de efectos finales.

En las Figuras 19 á 27 se representan a escala doble logarítmica los valores de $k'a$, corregidos por aproximaciones sucesivas al valor fijo común de G en cada serie, frente a los de la velocidad másica del agua L , correspondientes a los datos de las Tablas XXIII á XXXI.

Se observa fácilmente que la influencia de L sobre $k'a$ es apreciable pero de orden muy inferior a la de G sobre $k'a$. La pendiente de las rectas que mejor se adaptan a los resultados experimentales de las nueve series es de 0.15.

VI-3.2.3.

Ecuación final representativa.

Una vez obtenidos los valores de las pendientes de las series de experimentos de G y L frente a k'a se dedujo la expresión general para k'a válida para valores de G inferiores a 6.500 Kg/h.m². y el tipo de relleno ensayado, que resulto ser:

$$k'a = 5.2 G^{0,80} L^{0,15} \quad (57)$$

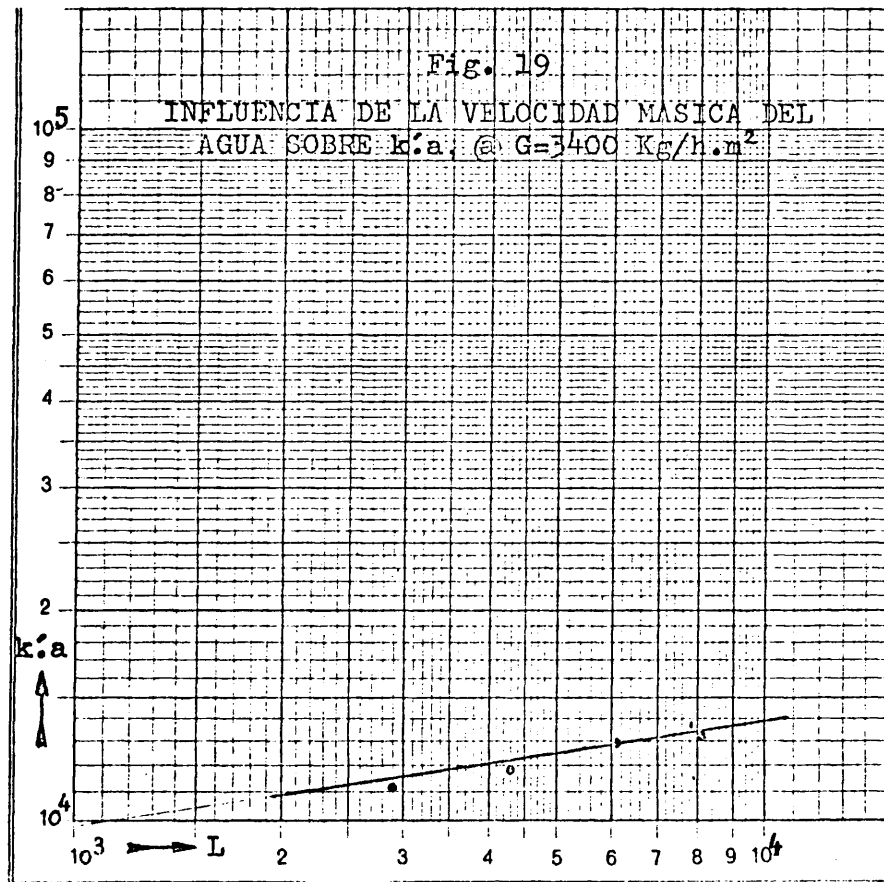
El error de esta expresión era menor de $\pm 10 \%$, es decir inferior al error con que puede obtenerse por el método del doble experimento.

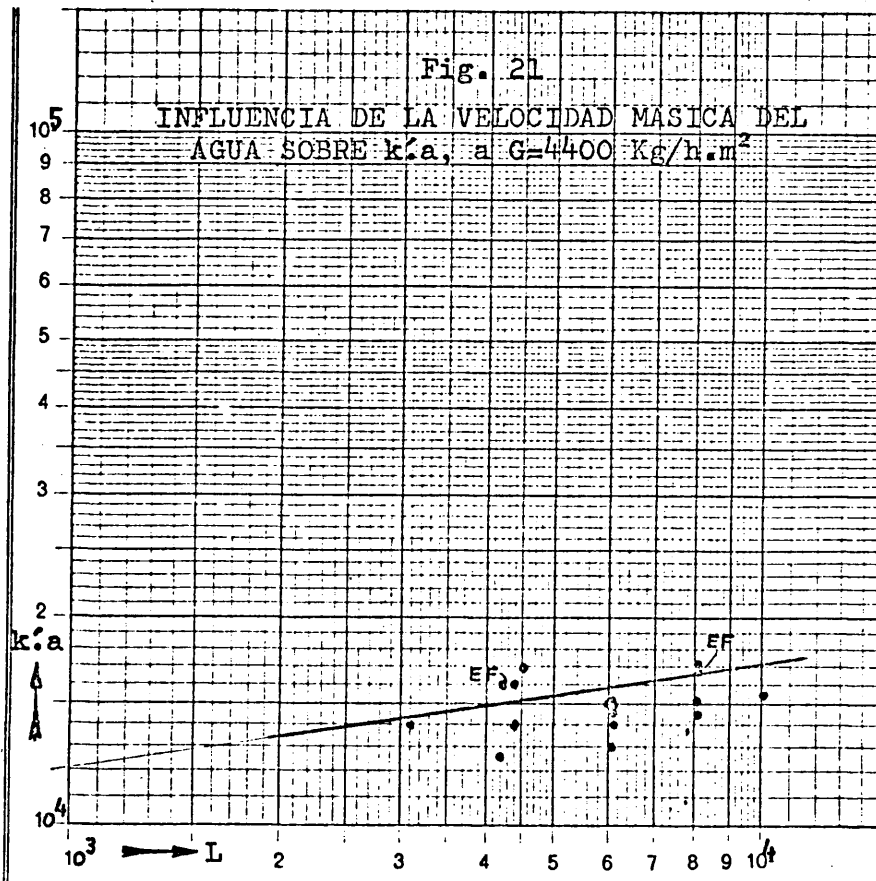
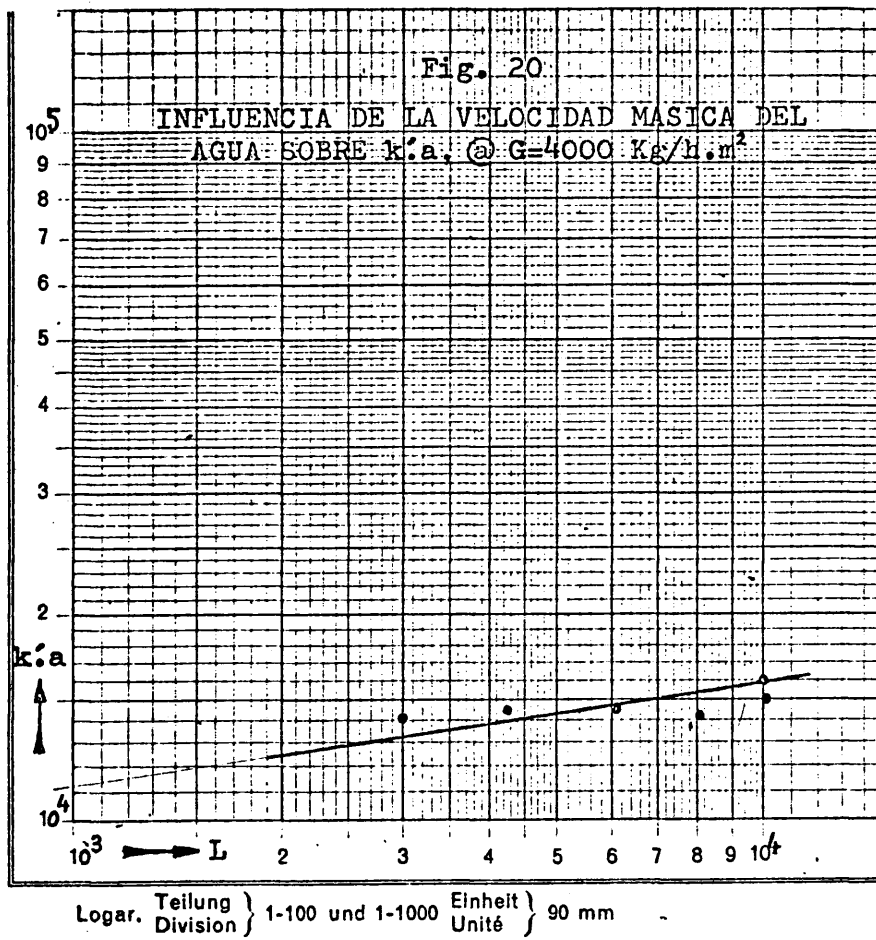
En las Figuras 19 á 27 y 37 á 41 se han dibujado las rectas resultantes de aplicar la ecuación (57) a cada serie de experimentos a fin de mostrar su concordancia con los resultados experimentales, que es patente para los experimentos "normales" a G inferior a 6.500 Kg/h.m², y apreciándose desviaciones, por las razones indicadas, de los experimentos "marginales".

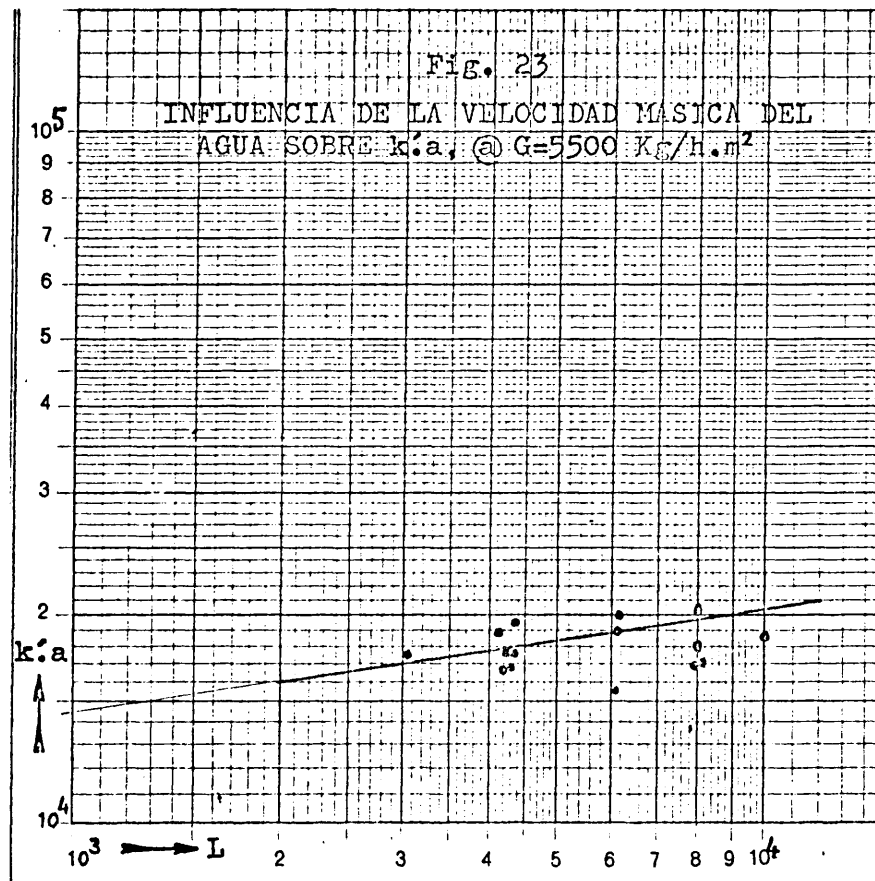
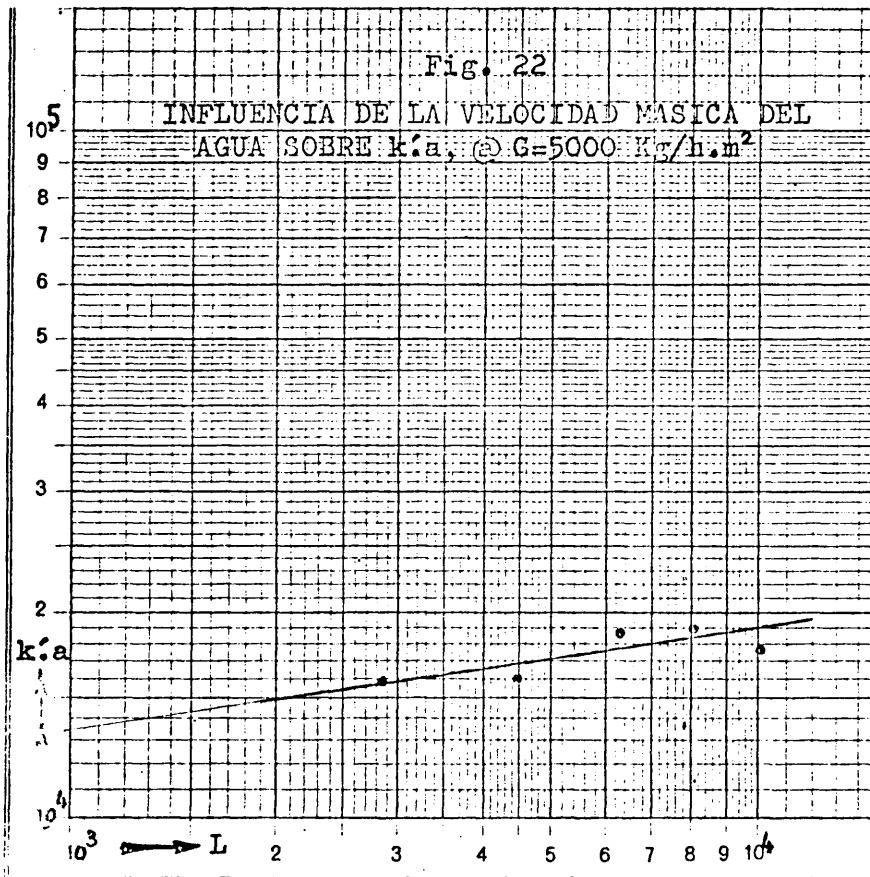
Según la relación de Lewis la ecuación representativa del coeficiente volumétrico individual de transmi-

sión de calor a través de la fase gaseosa, $h_G a$, resulta ser

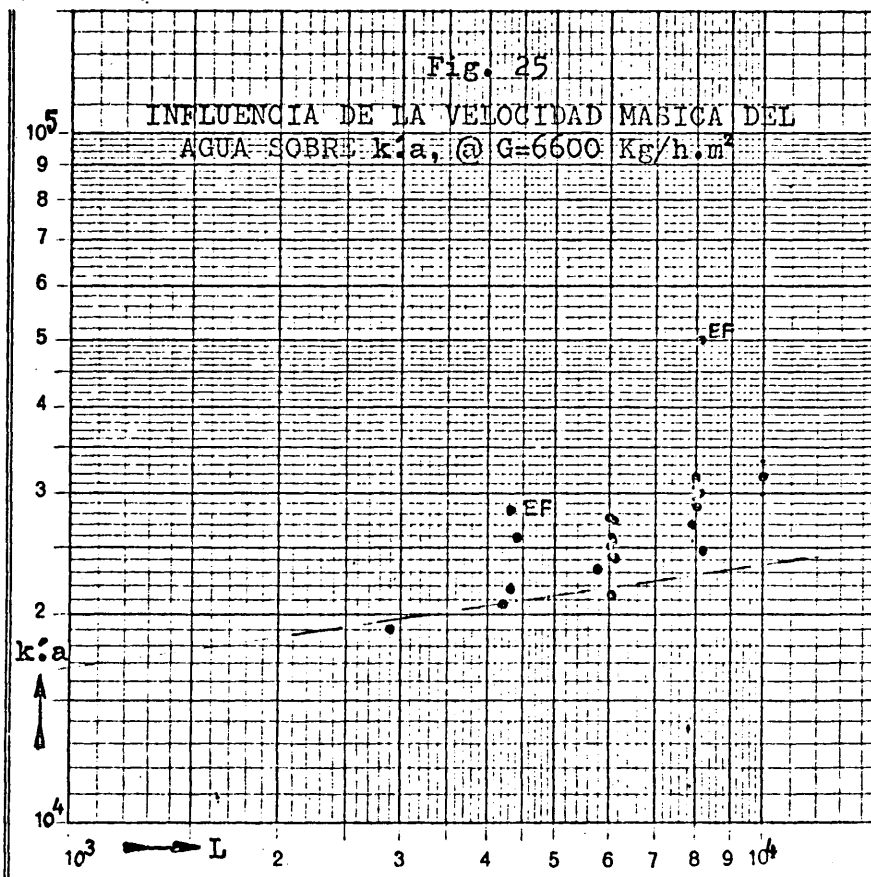
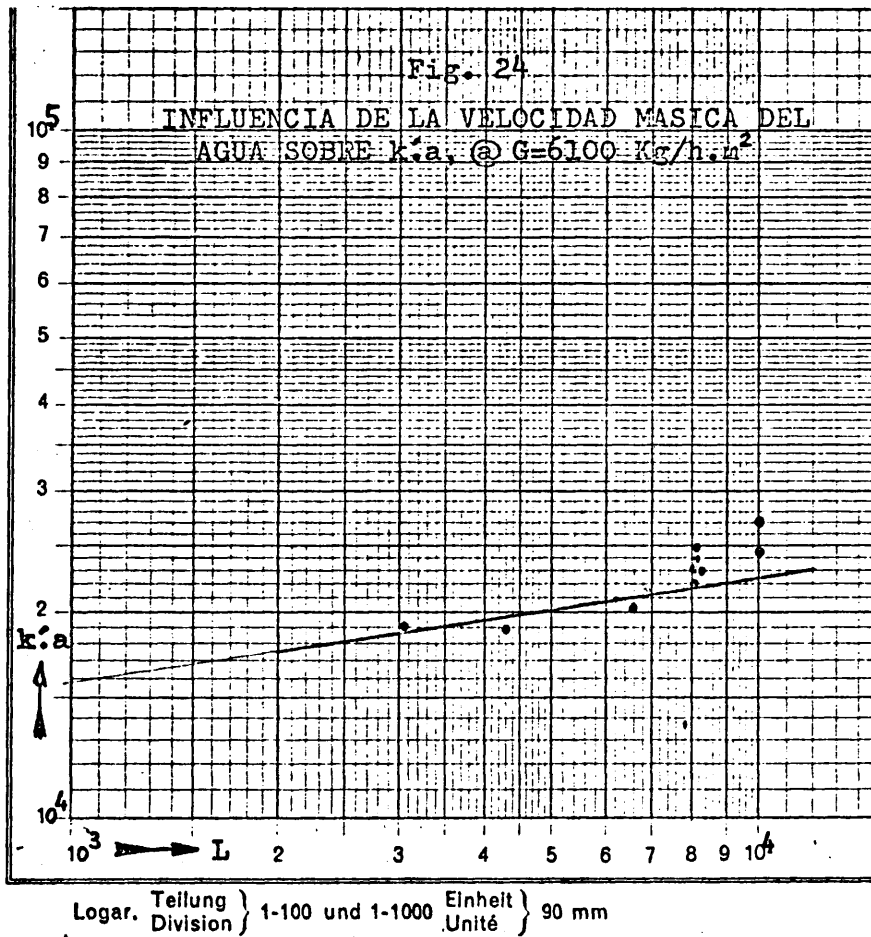
$$h a = 1.28 G^{0,80} L^{0,15} \quad (58)$$

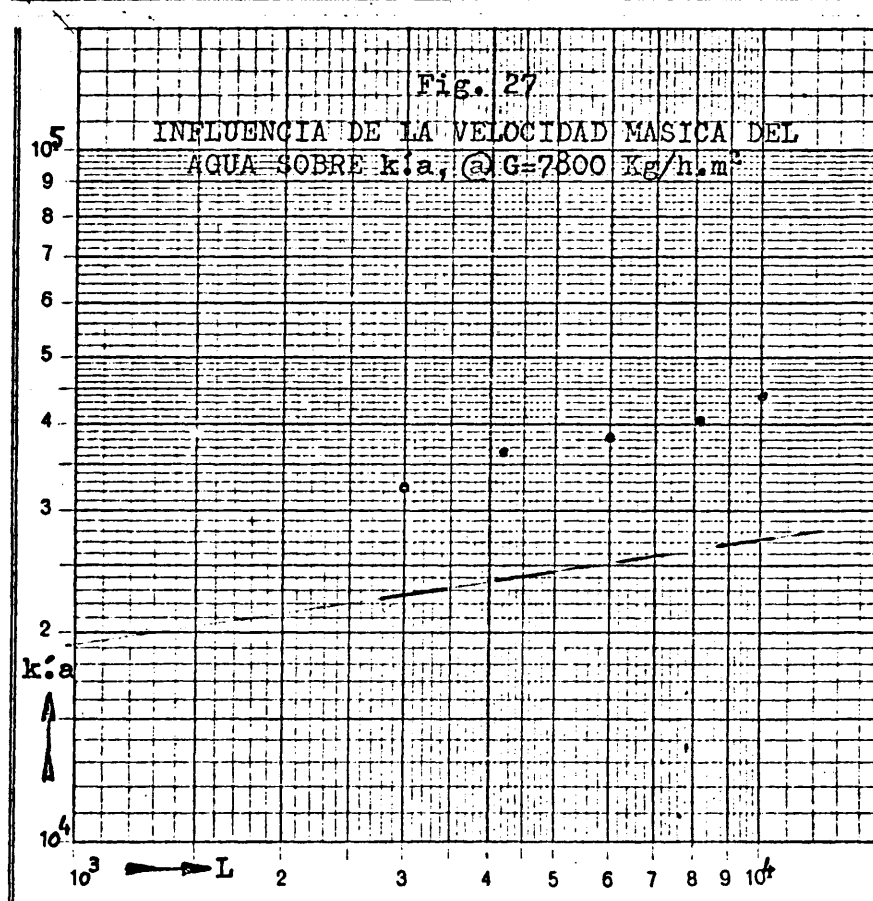
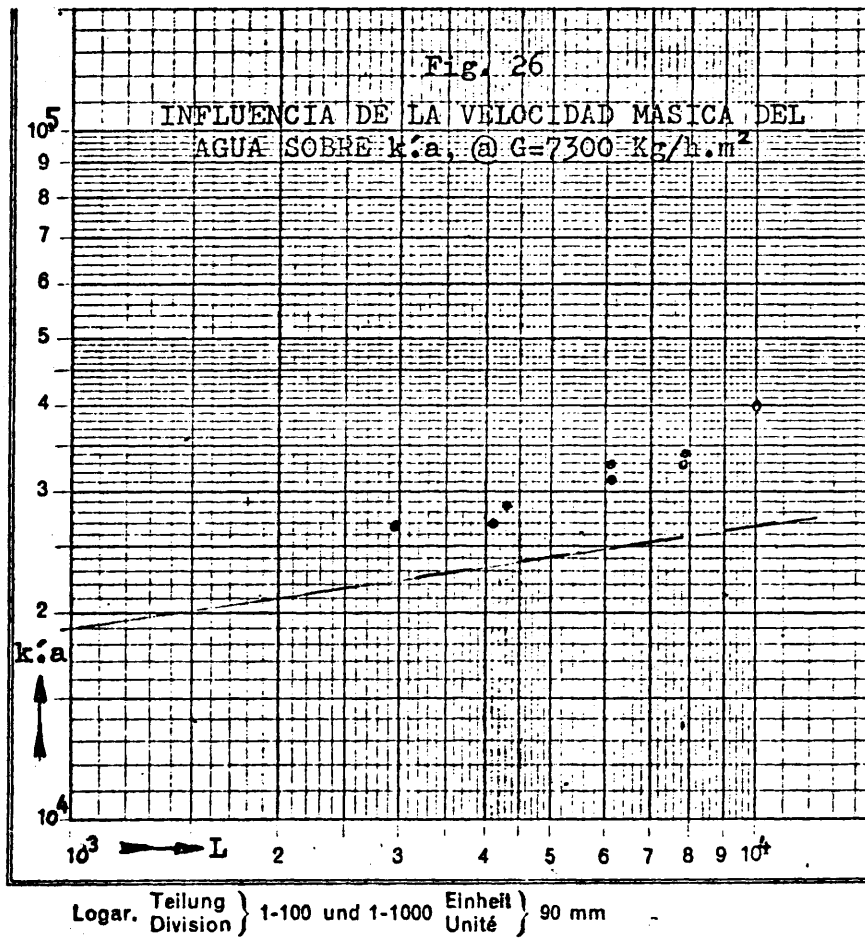






Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
 Division } Unité }





VI-3.3.

Influencia de las velocidades másicas de aire y agua sobre el coeficiente volumétrico individual de transmisión de calor a través de la fase líquida, h_{La} .

La influencia de L y G sobre h_{La} se deduce de los resultados experimentales resumidos en las Tablas XXIII á XXXI que recogen los de las nueve series de experimentos realizados. Cada serie se llevó a cabo a una determinada velocidad másica del aire, G , mantenida aproximadamente constante en todos los experimentos de la misma serie. Los valores de la velocidad másica del aire fueron, $G = 3.400, 4.000, 4.400, 5.000, 5.500, 6.100, 6.600, 7.300$ y 7.800 Kg/h.m^2 , variando en cada serie los valores de la velocidad másica del agua, L , entre 3.000 y 10.100 Kg/h.m^2 .

VI-3.3.1. Análisis de los resultados a escala semilogarítmica.

Los datos experimentales representados en escala semilogarítmica presentan una dispersión muy superior a la que se obtiene con los datos de los coeficientes de transporte en la fase gaseosa. Esto era de esperar pues el Método de Mickley permite obtener el coeficiente individual de transmisión de calor en la fase líquida, h_{La} a partir del de transferencia de materia en la fase gaseosa $k'a$ y la pendiente de las rectas de unión, y ambos datos tienen su co-

rrrespondiente error. Los datos suministrados por el ordenador electrónico muestran que el error con que se obtiene h_{La} es 3.3 veces superior al error con que se obtiene $k'a$, por lo que los datos experimentales para h_{La} presentarán una dispersión de $\pm 33 \%$, ya que el error medio con que se obtiene $k'a$ es de $\pm 10 \%$. Este error, indudablemente elevado, es superior al encontrado por otros investigadores, Thomas y Houston (14) Masiá (15), que emplearon el Método de Mickley para obtención de los coeficientes de transporte, pero la exactitud de cálculo del ordenador demuestra que el error del método es acumulativo sobre el de $k'a$. Otros procedimientos, como el utilizado por Mc.Adams (17) permiten obtener este coeficiente con menos error.

En las Figuras 28-bis á 36-bis se han representado en escala semilogarítmica los valores de h_{La} frente a L de cada serie de experimentos a G fija. Se dedujo gráficamente la ecuación correspondiente a cada una de las nueve series de experimentos y a partir de éstas una fórmula general de h_{La} en función de L y G . La ecuación hallada fué

$$\log h_{La} = 4.087 - 0.125 \times 10^{-4}G + \\ + (0.860 - 0.402 \times 10^{-4}G)10^{-4}L \quad (59)$$

y viene representada en línea de trazos en las Figuras

28-bis á 36-bis para mostrar su correspondencia con los datos experimentales. Esta ecuación resulta poco "realista" para la dispersión con que se obtienen los datos experimentales, pues en efecto no era posible entrar estadísticamente la influencia real de G sobre h_{La} a velocidades másicas

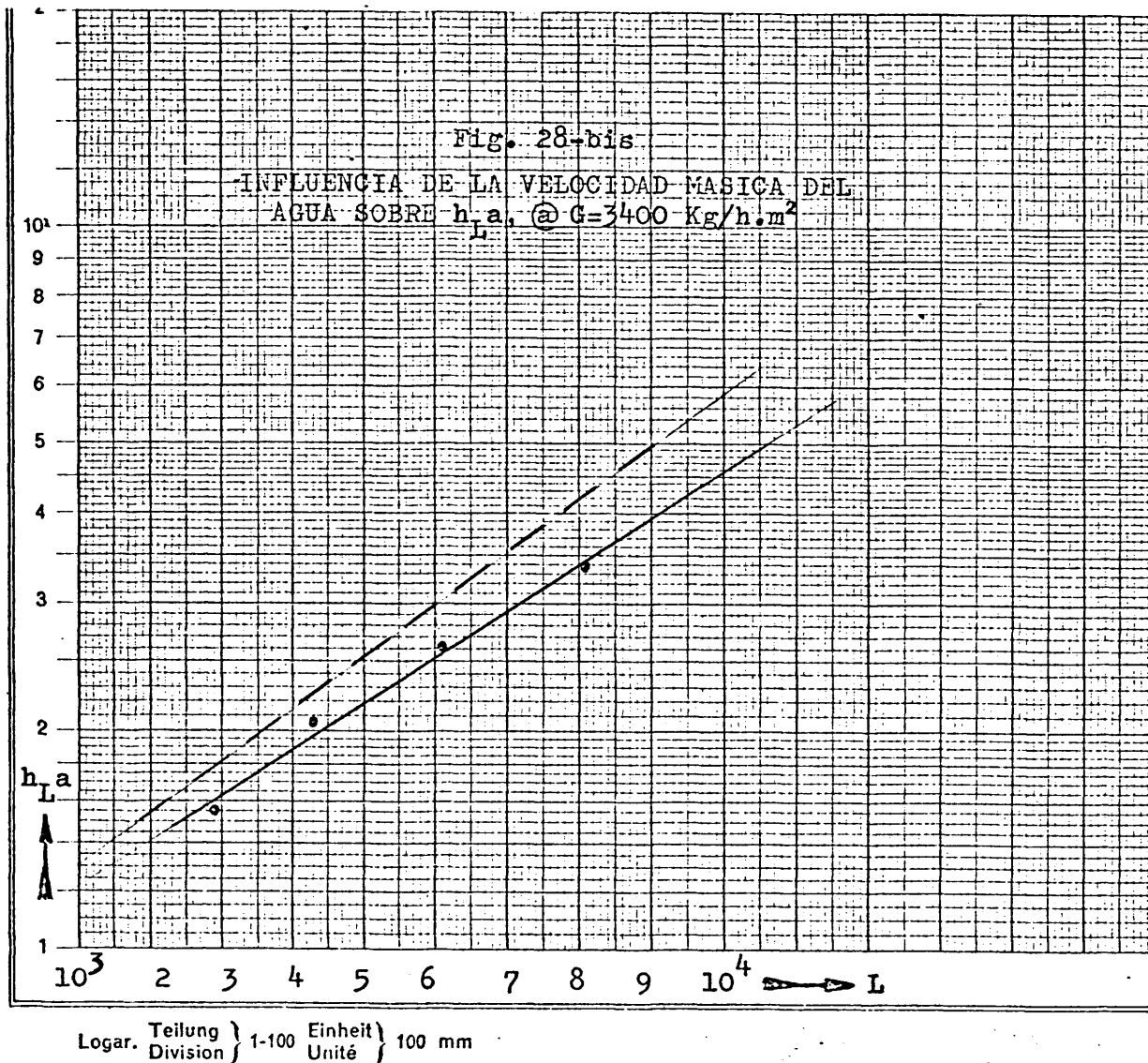


Fig. 29-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} , @ $G=4000 \text{ Kg/h.m}^2$

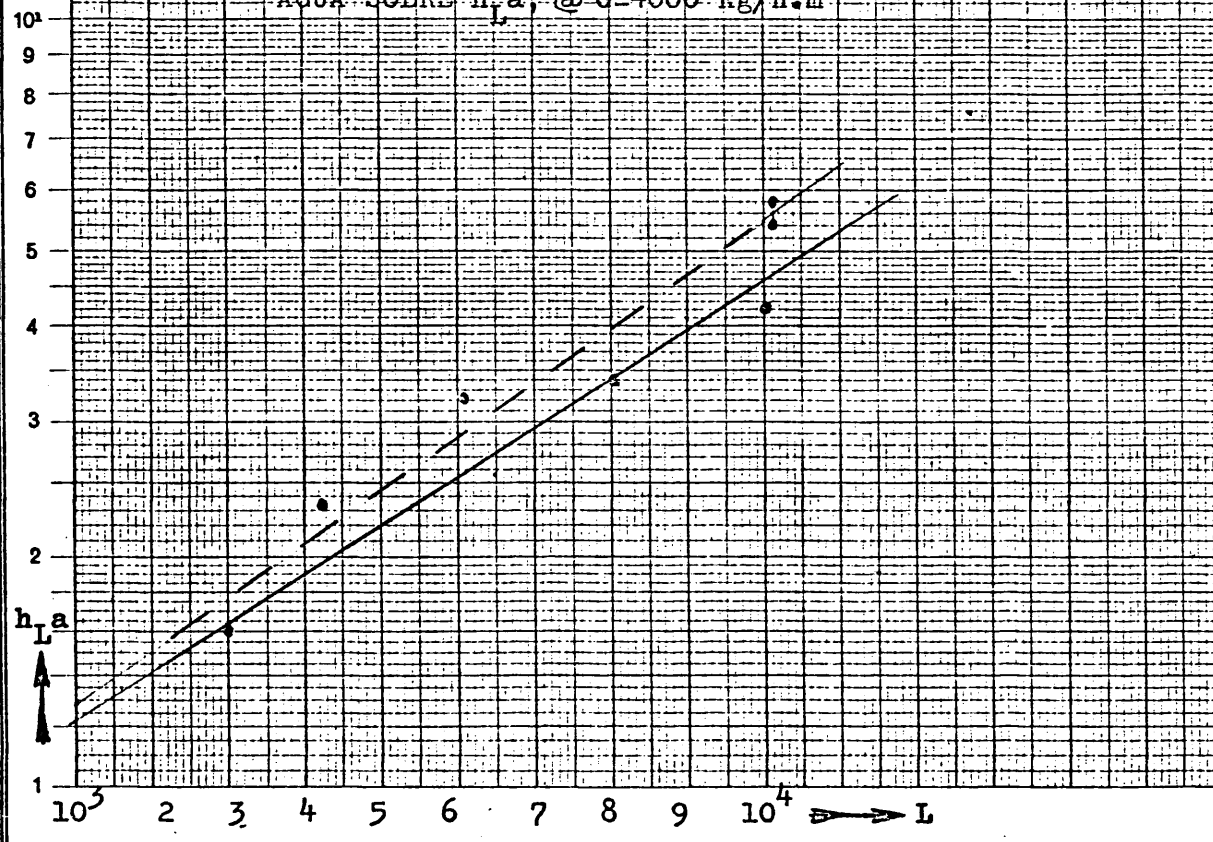


Fig. 30-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} , @ $G=4400 \text{ Kg/h.m}^2$

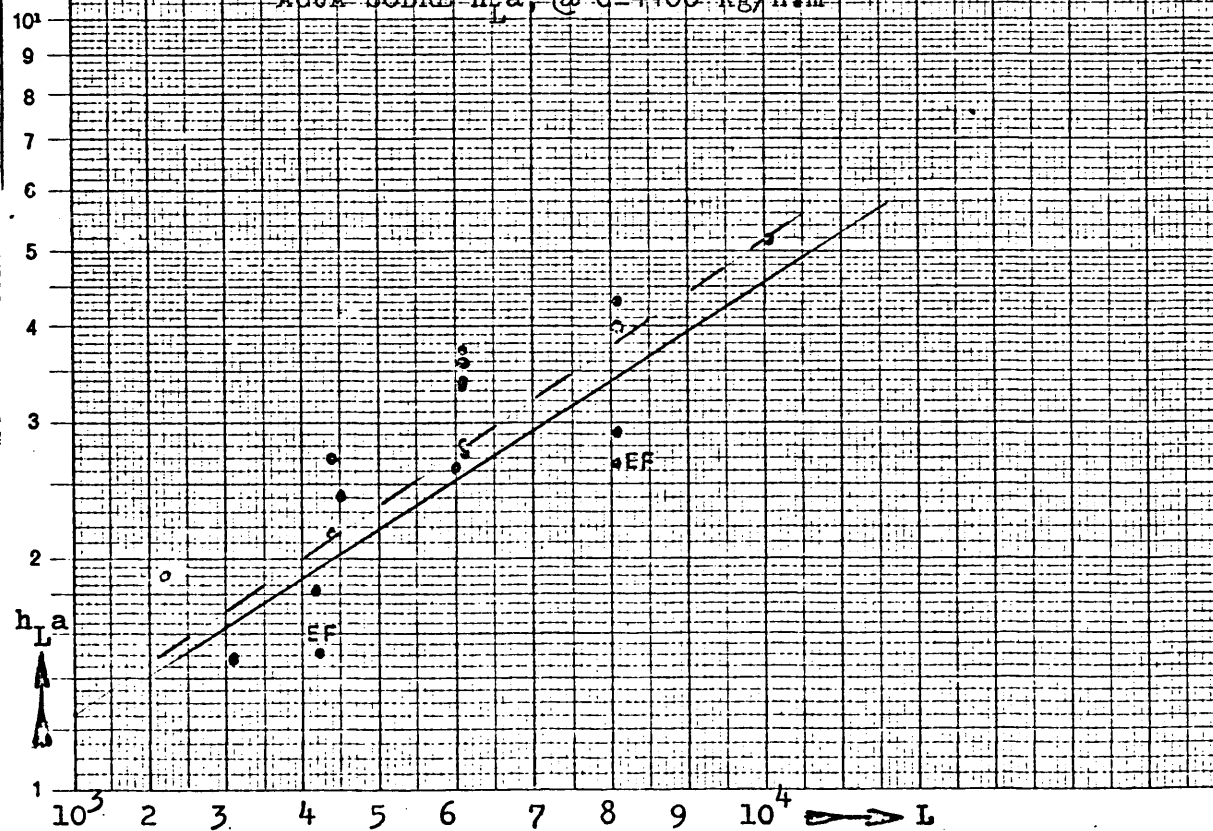


Fig. 31-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} , @ $G=5000 \text{ Kg/h.m}^2$

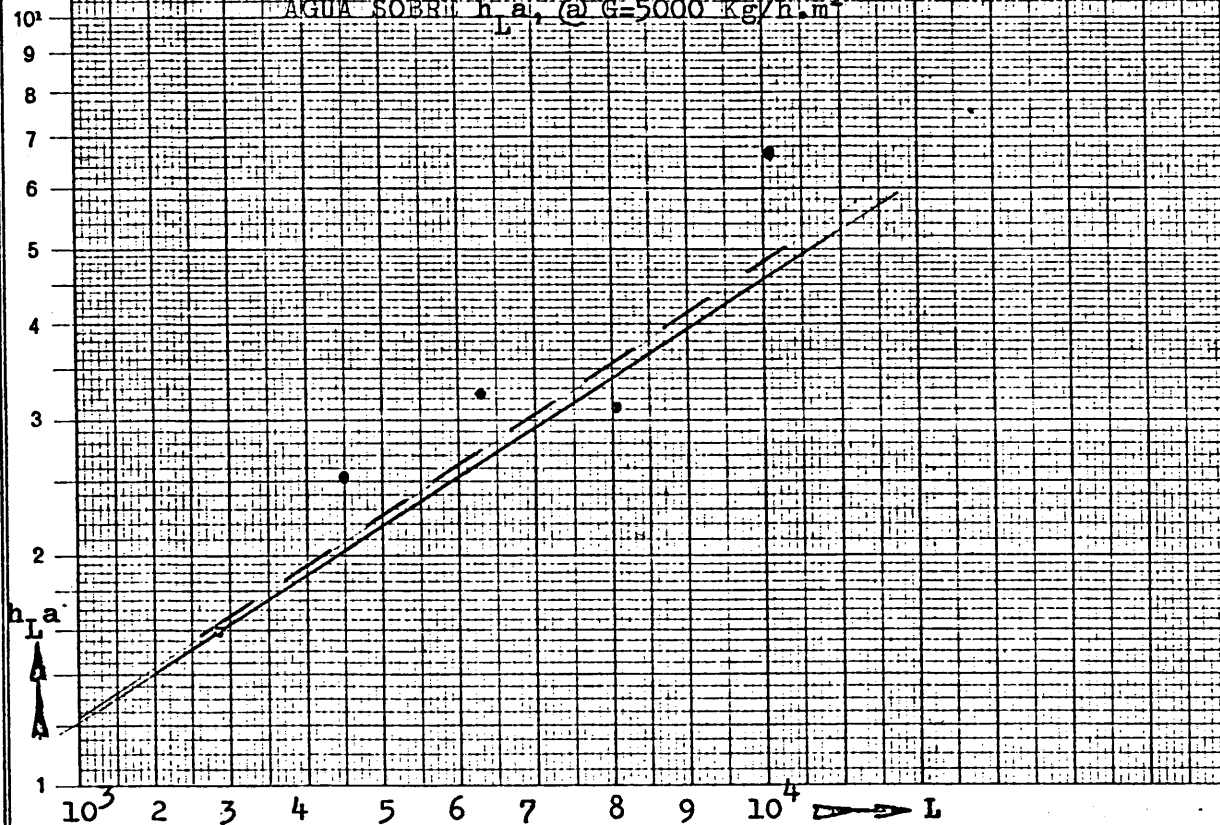
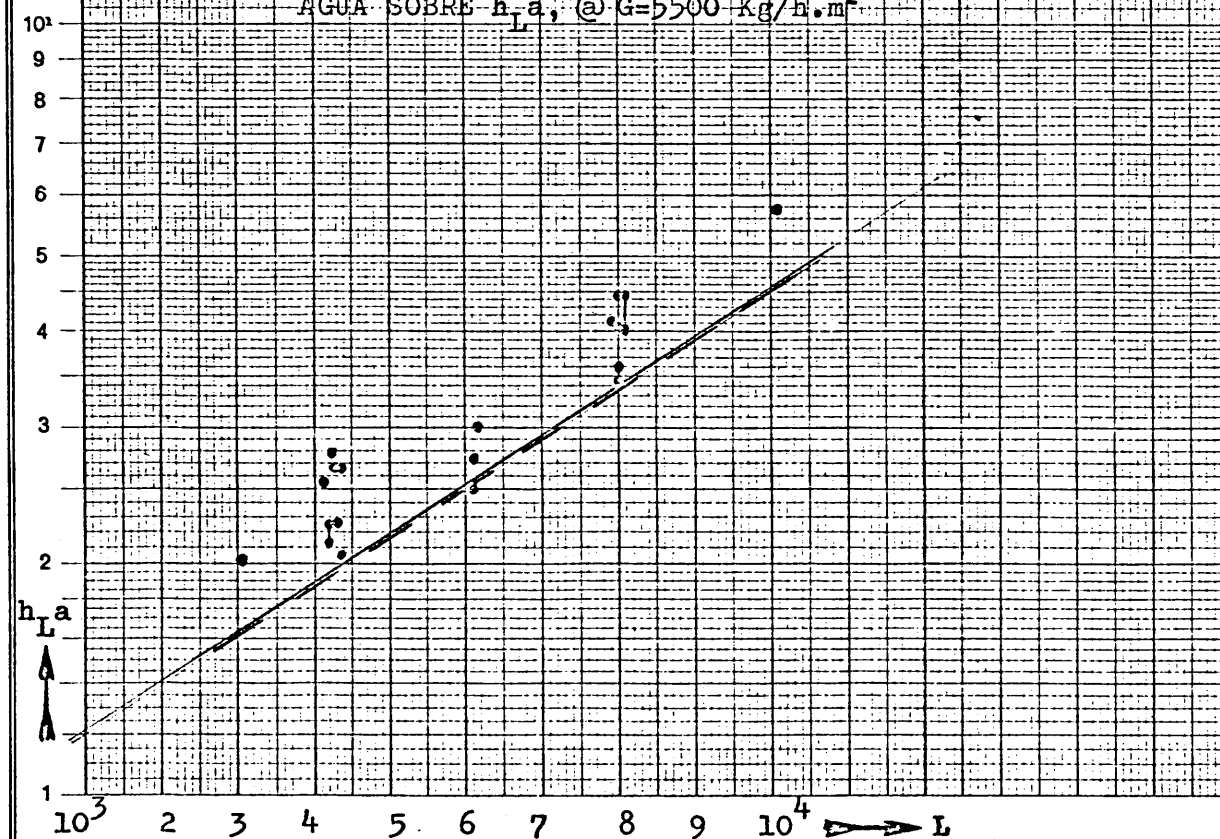


Fig. 32-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} , @ $G=5500 \text{ Kg/h.m}^2$



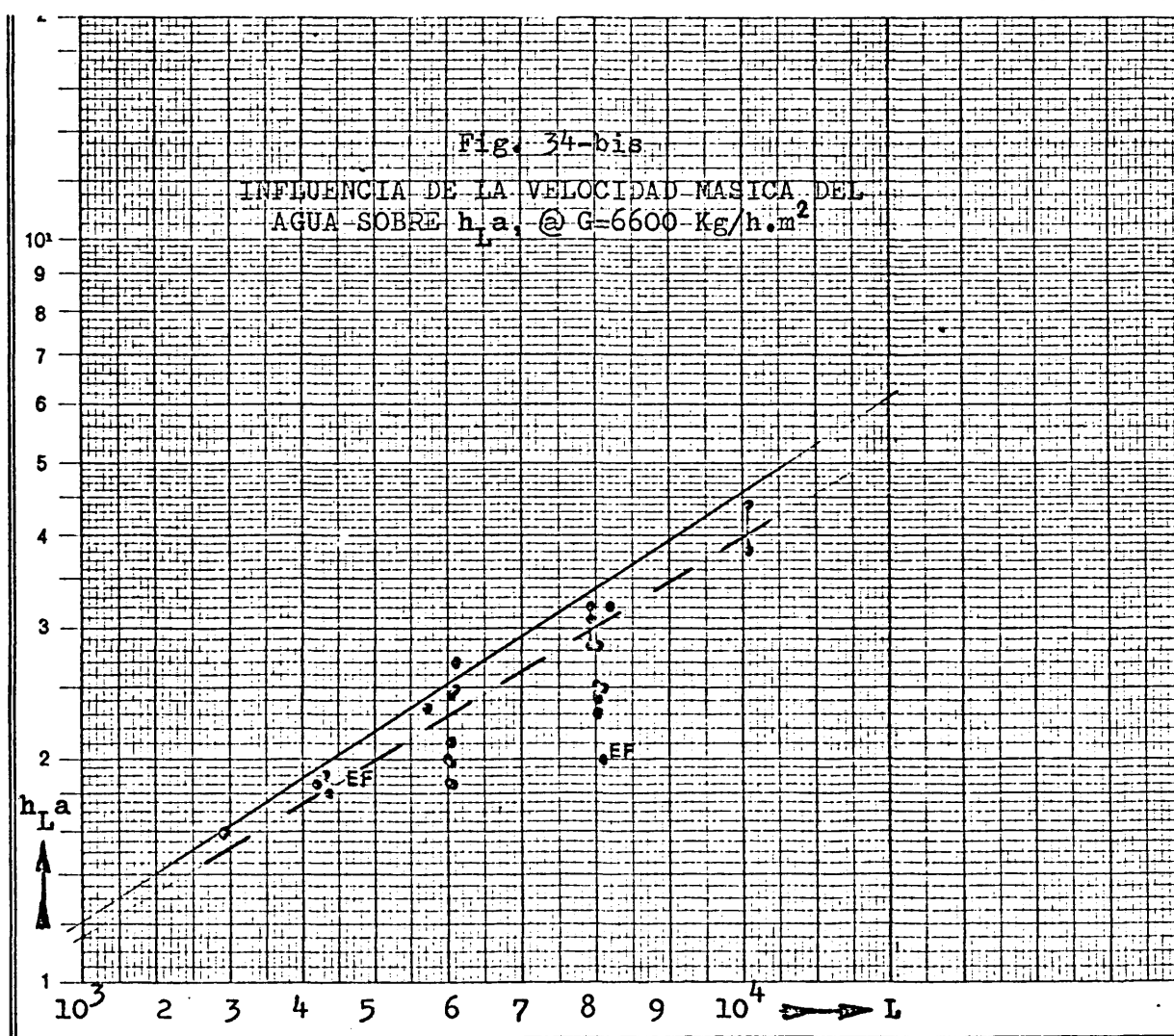
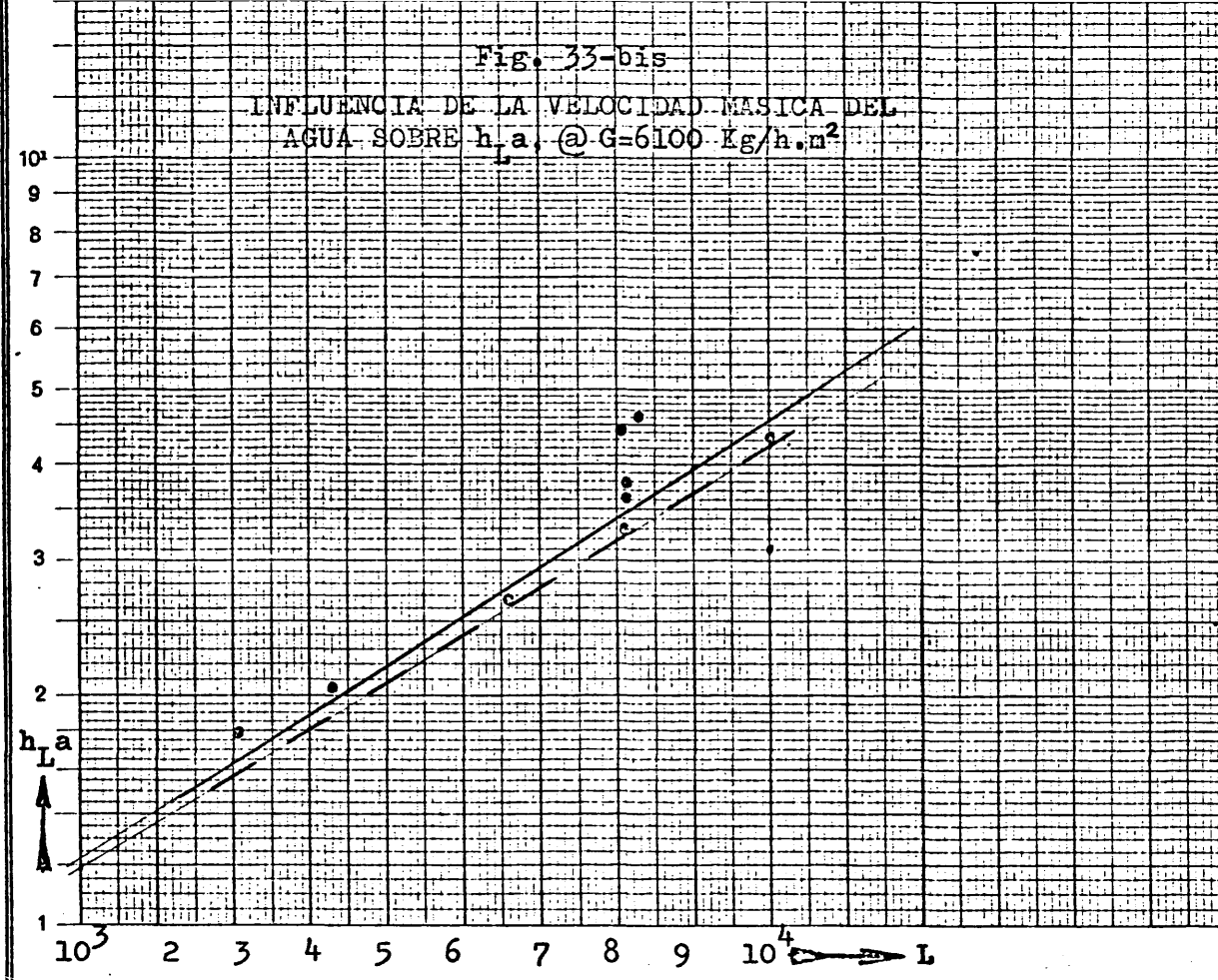


Fig. 35-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} @ $G=7300 \text{ Kg/h.m}^2$

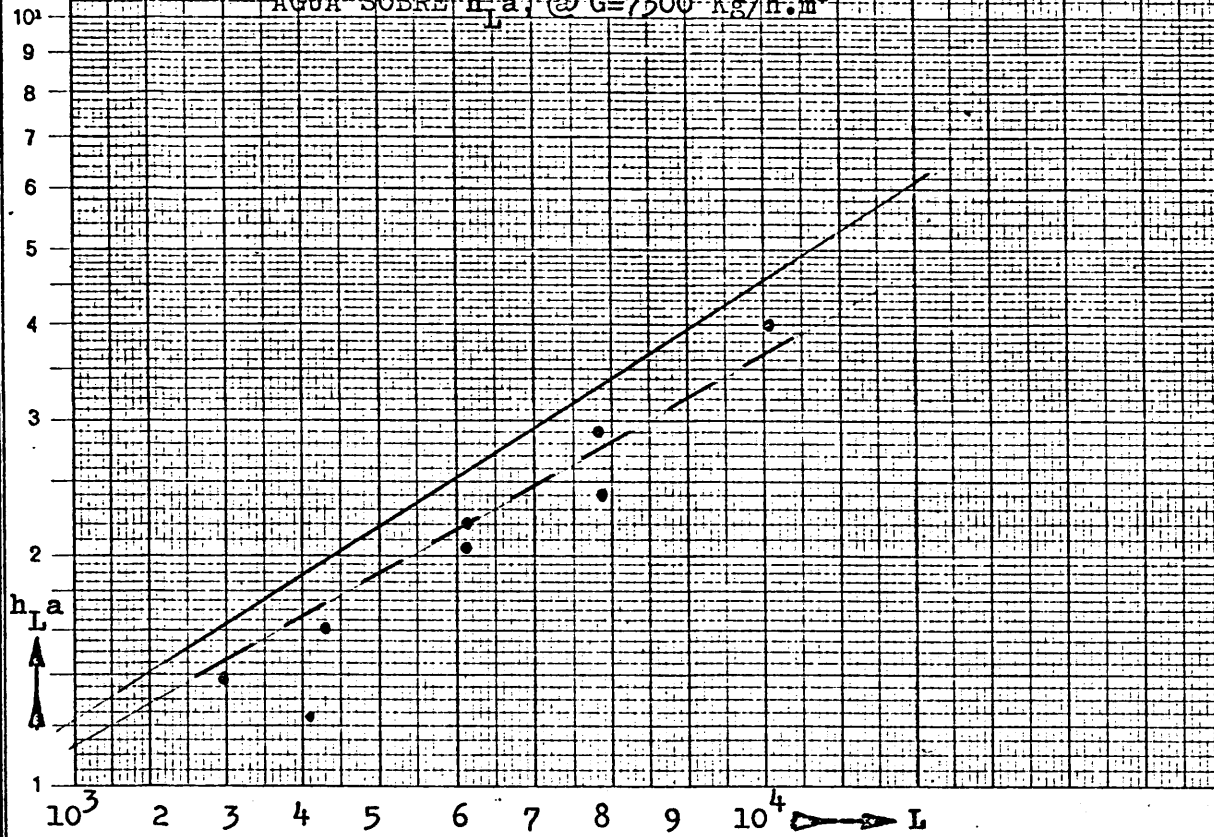
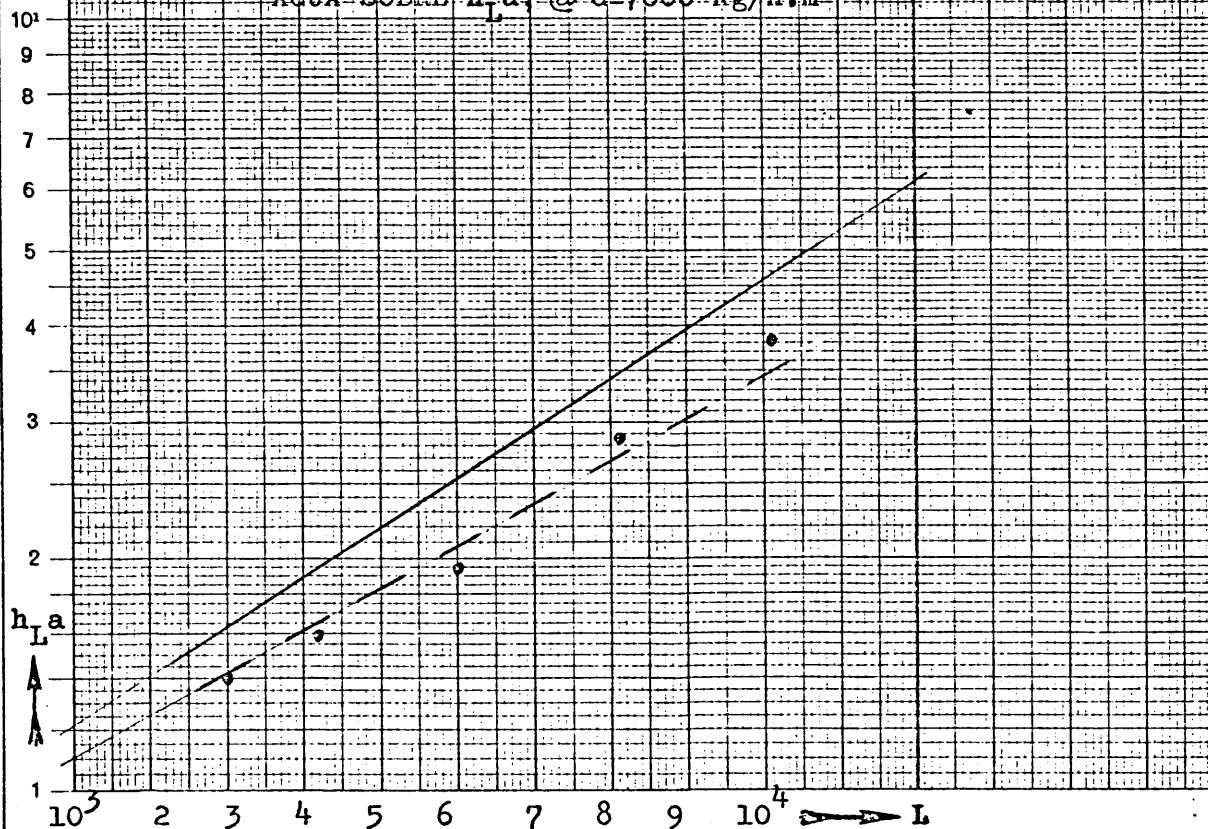


Fig. 36-bis

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL
AGUA SOBRE h_{La} @ $G=7800 \text{ Kg/h.m}^2$



del aire inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 . La ecuación anterior quedaba entonces reducida a la forma más simple

$$\log h_L a = 4.02 + 0.64 \times 10^{-4} L \quad (60)$$

que está dibujada con línea continua en las figuras 28-bis á 36-bis.

VI-3.3.2.

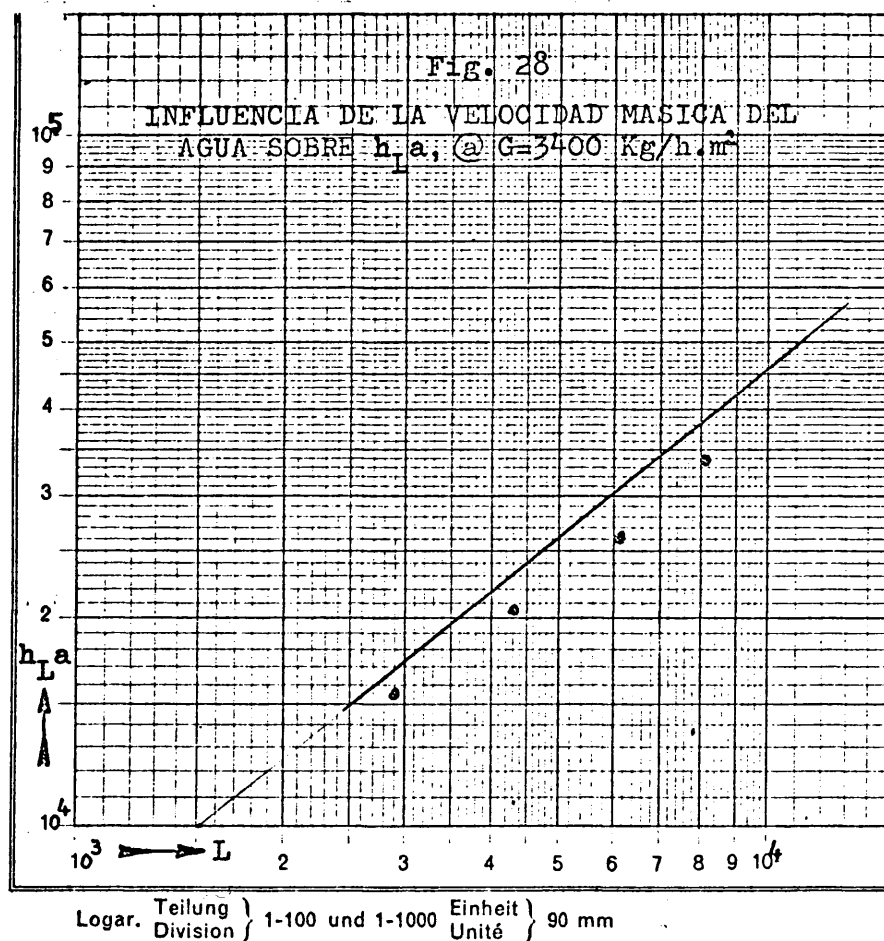
Análisis de los resultados en escala doble logarítmica.

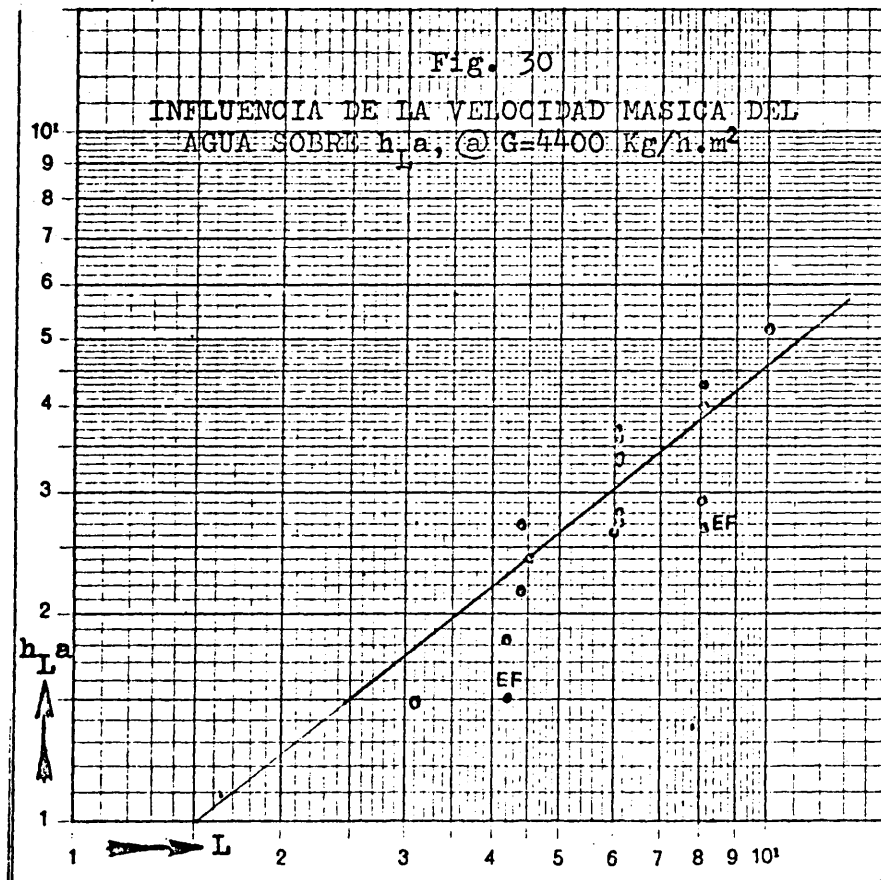
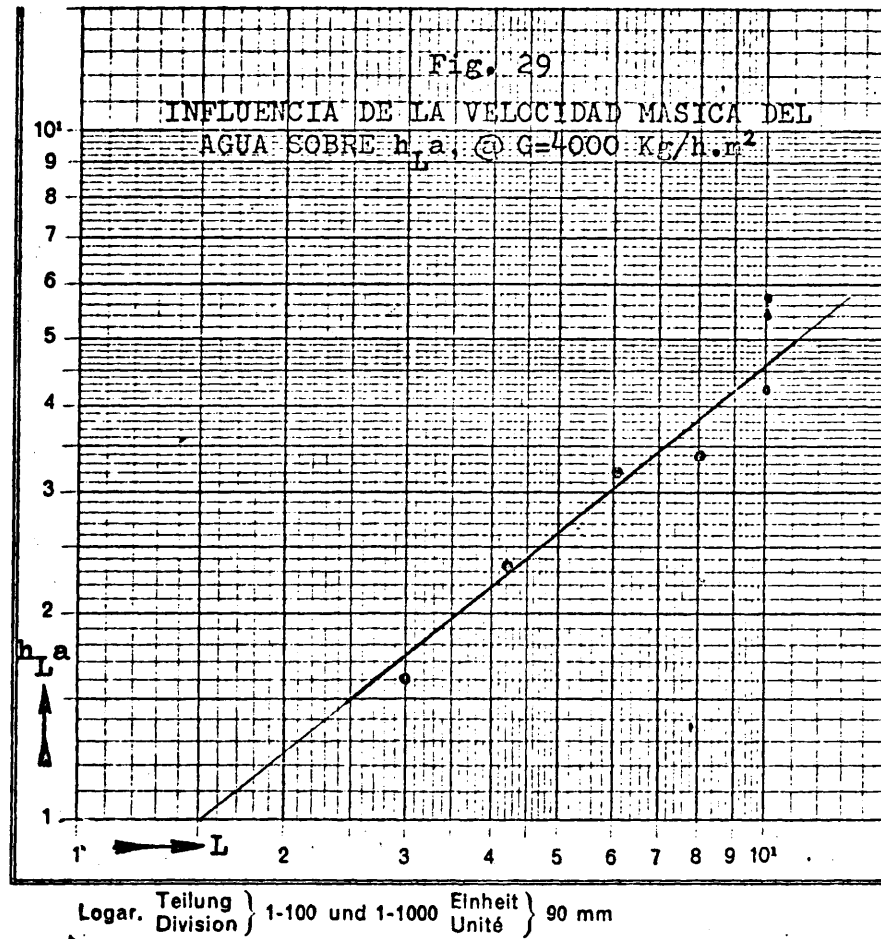
Siguiendo un razonamiento paralelo al utilizado en el caso del estudio del coeficiente $k'a$, se repitió el estudio de la influencia de las variables principales sobre $h_L a$ para deducir una ecuación sencilla del tipo $h_L a = K \cdot G^m \cdot L^n$: las figuras 28 á 36 representan en escala doble logarítmica para cada serie de experimentos a G fijo, los valores de $h_L a$ frente a los de L , correspondientes a las Tablas XXIII á XXI.

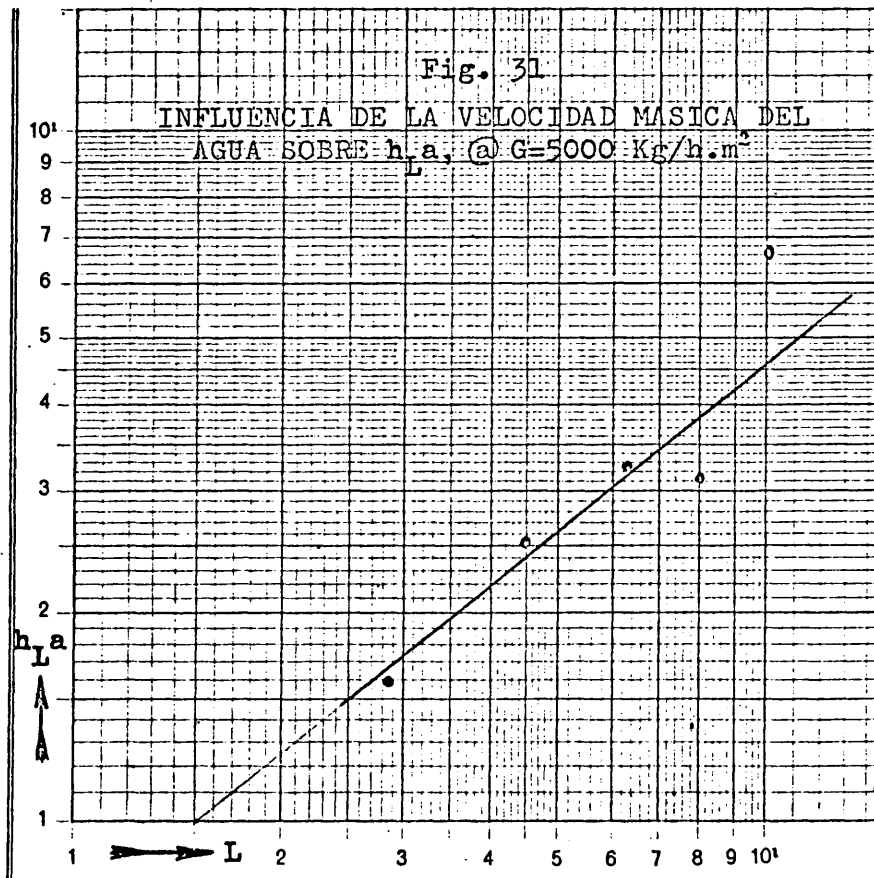
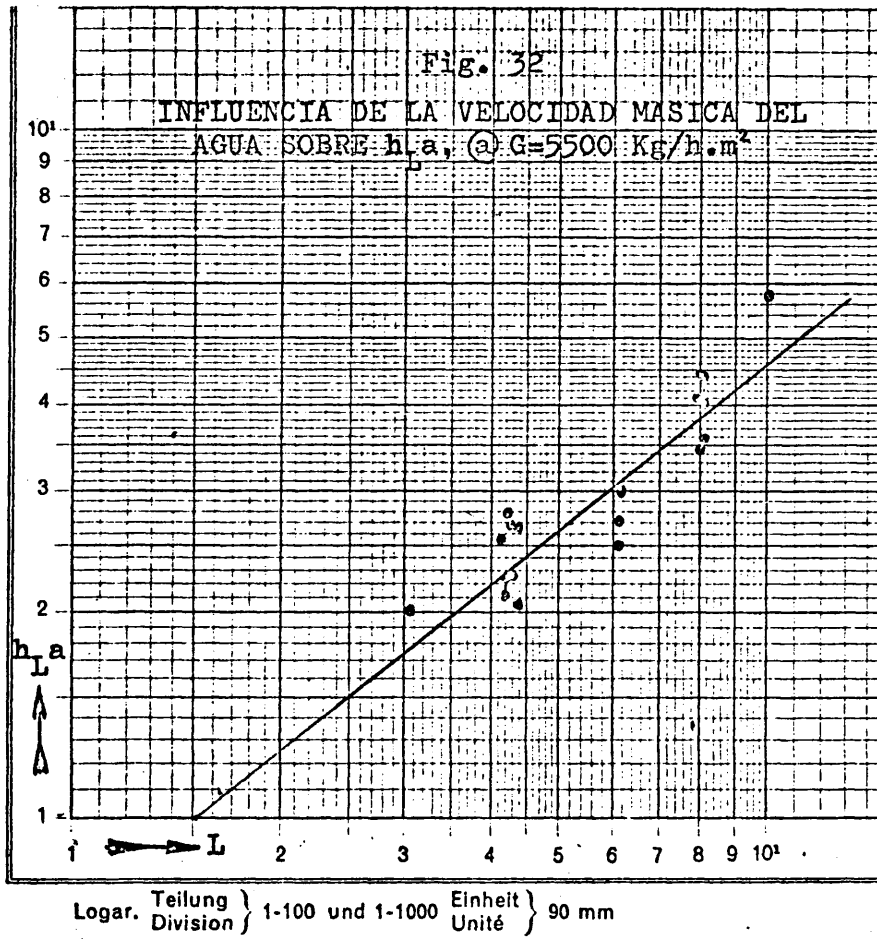
Se dedujo que los puntos de cada serie se alinean a lo largo de rectas de pendiente 0.80.

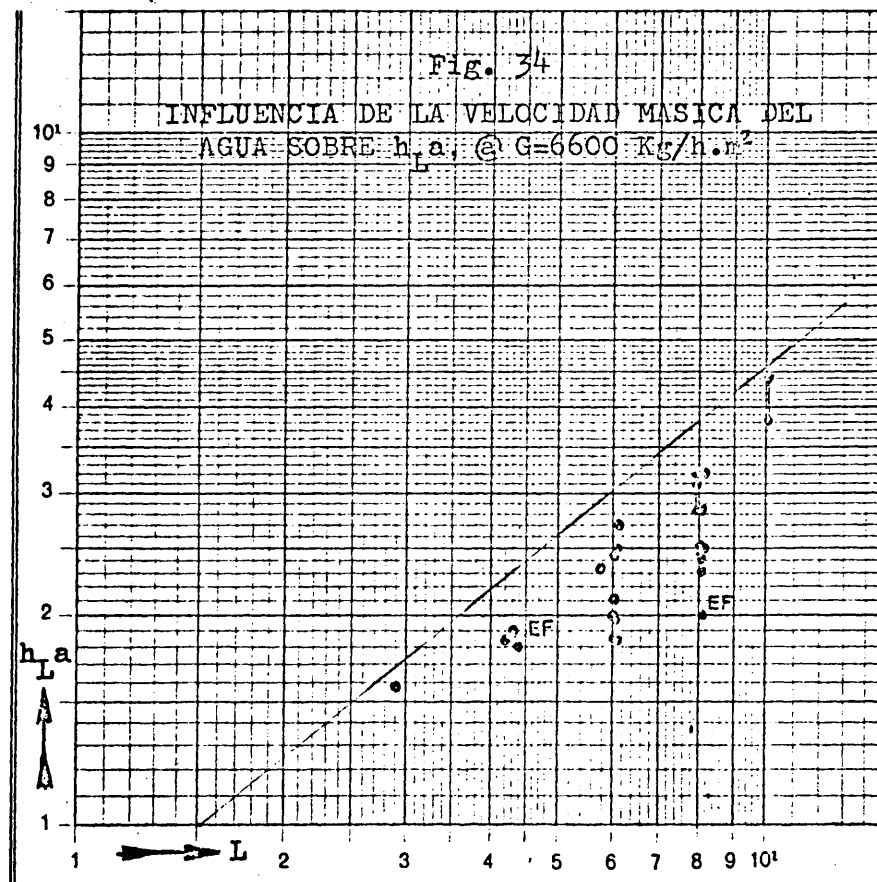
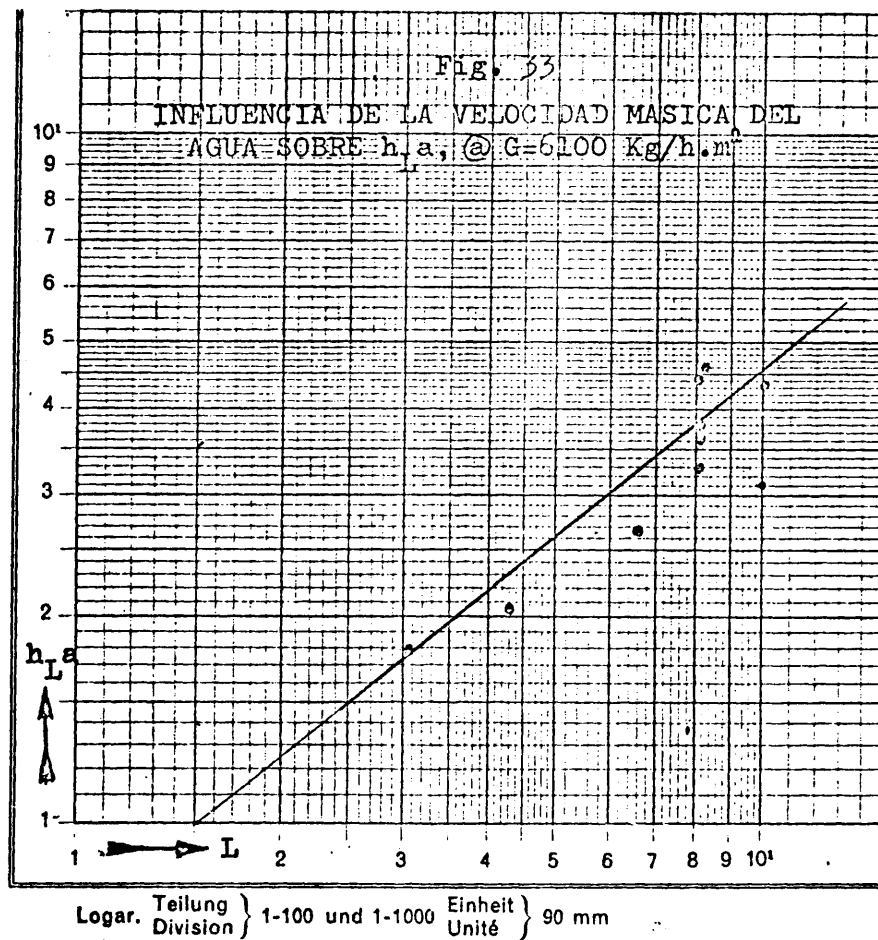
Para estudiar la influencia de la velocidad másica del aire sobre $h_L a$ se representaron en las Figuras 42 á 46 y

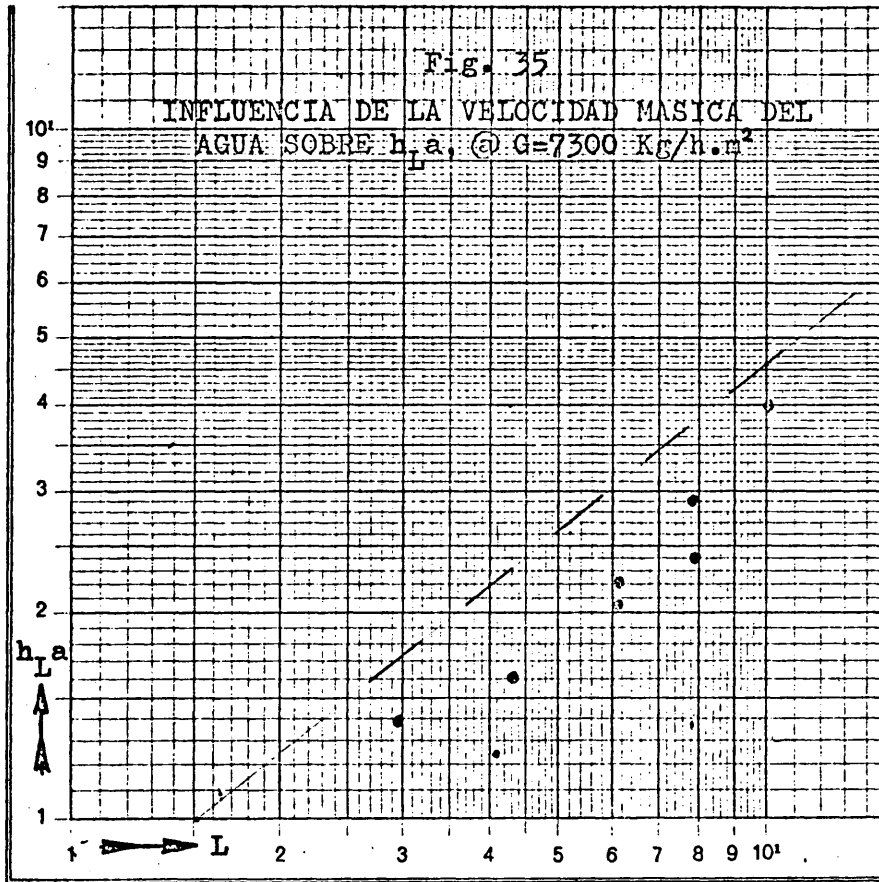
en escala doble logarítmica los valores de h_{La} frente a G resumidos en las Tablas XVIII á XXII, correspondientes a las cinco series de experimentos a L constante, observándose que, hay una gran dispersión de los valores y una tendencia clara aparente a descender el valor de h_{La} al aumentar el de G por encima de 6.500 Kg/h.m^2 , fenómeno ya discutido anteriormente. Para deducir la ecuación final representativa



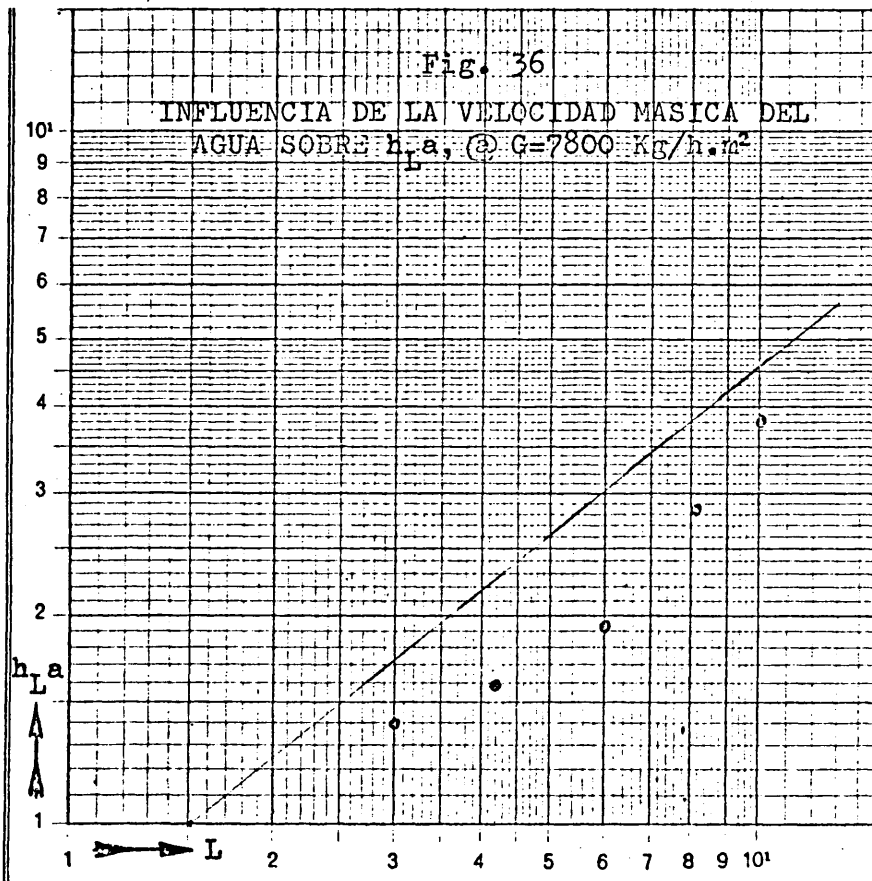




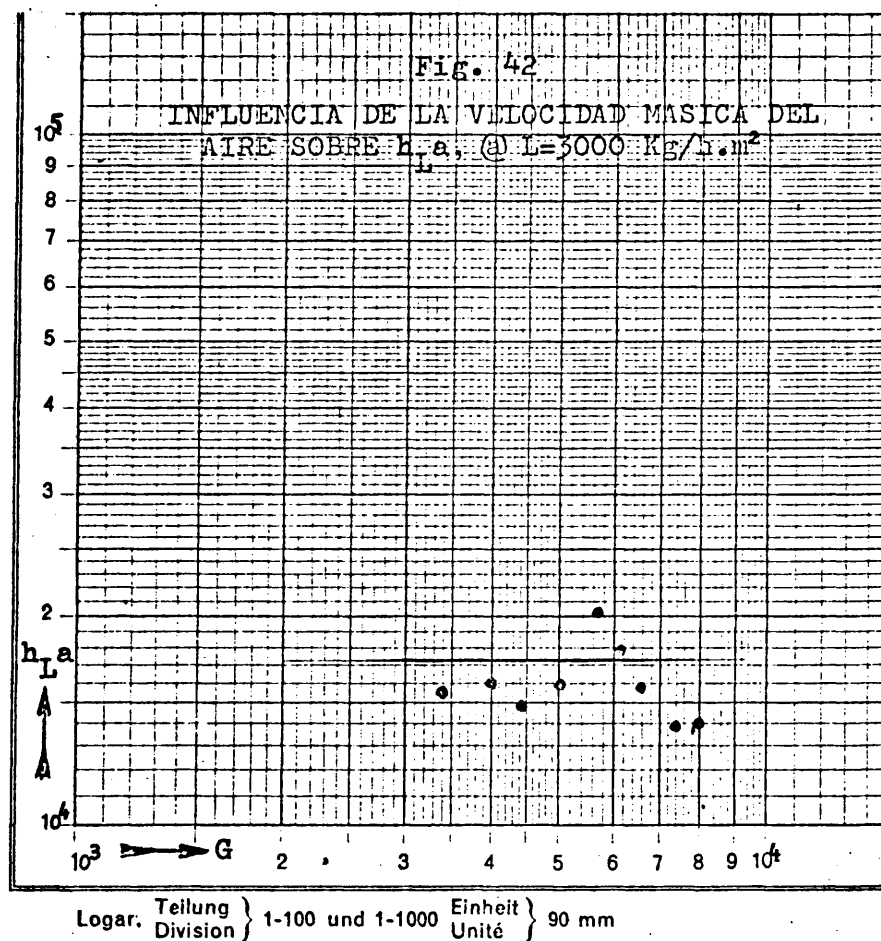


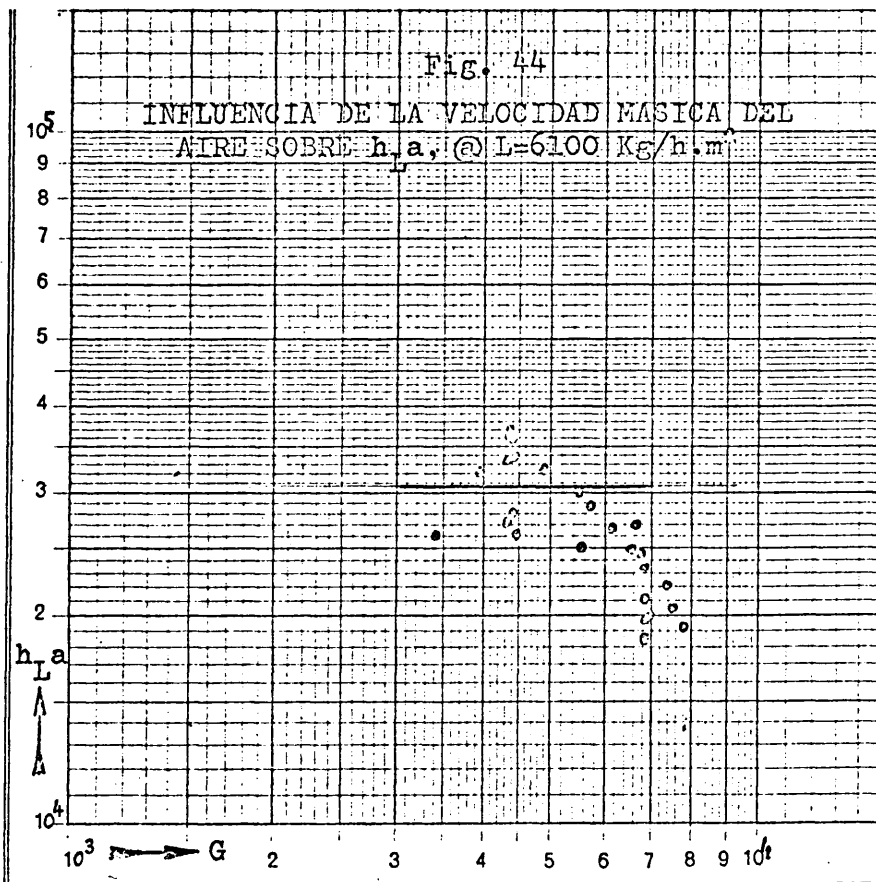
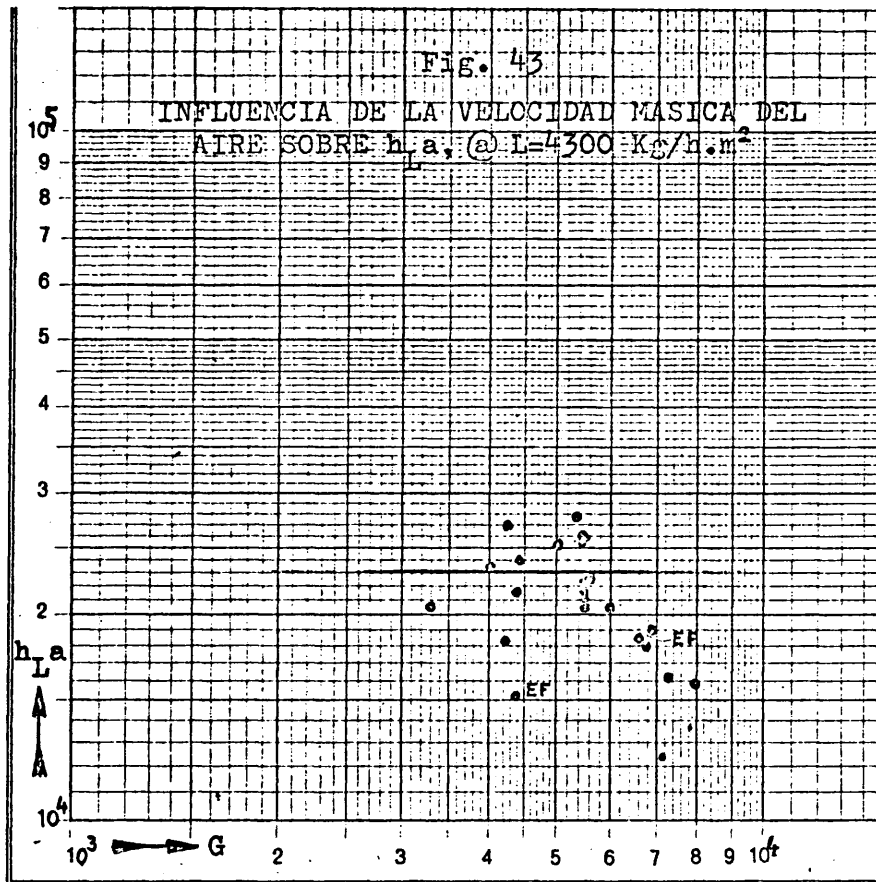


Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
 Division }
 Unité }

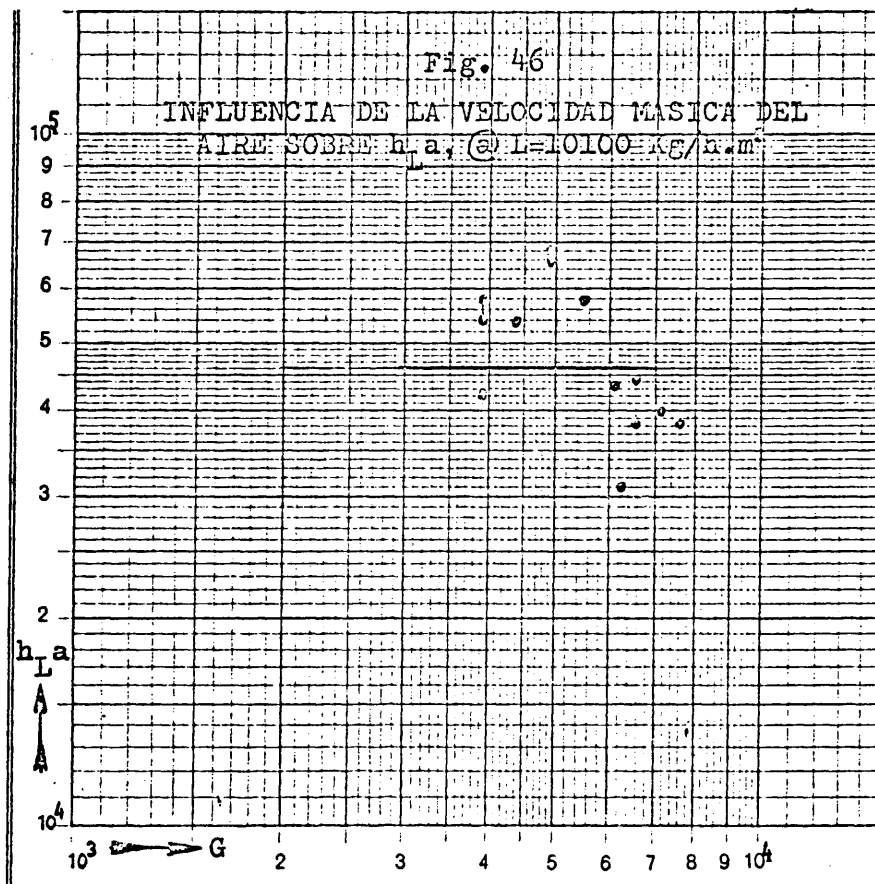
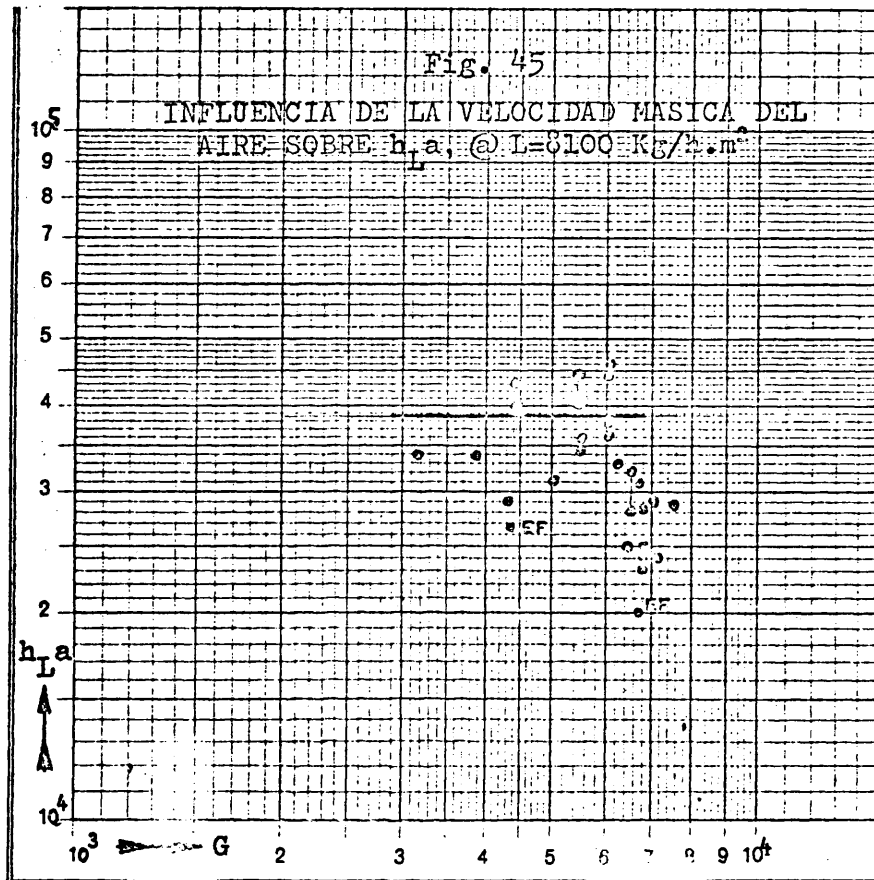


de h_{La} no se tuvieron en cuenta los experimentos "marginales" en que se había producido pulverización y se llevó a la conclusión de que, estadísticamente la velocidad másica del aire G no influye sobre h_{La} para valores de G inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 .





Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
Division } Unité }



Logar. Teilung } 1-100 und 1-1000 Einheit } 90 mm
Division } Unité }

VI-3.3.3.

Ecuación final representativa.

En ese intervalo de operación y para el tipo de relleno ensayado, la expresión deducida para el coeficiente de transporte h_{La} resultó ser:

$$h_{La} = 28.6 L^{0.8} \quad (61)$$

El error de esta expresión era menor de $\pm 33 \%$.

En las Figuras 28 á 36 y 42 á 46 se ha dibujado la recta correspondiente a aplicar dicha ecuación, para mostrar su representabilidad frente a los resultados experimentales, que es satisfactoria para valores de G inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 .

Esa ecuación es válida a efectos prácticos en las condiciones de trabajo indicadas. Sin embargo en las Figuras 42 á 46 parece observarse un máximo entre $G = 4.000$ y $G = 6.000 \text{ Kg/h.m}^2$. Aunque, como hemos indicado, la dispersión de resultados no permite determinar cuantitativamente este hecho, puede concluirse que debido a la alta "densidad" del relleno empleado, la velocidad del aire es superior a la normal en otros rellenos de este tipo para la misma velocidad másica del aire y prácticamente no resulta

conveniente elevarla por encima del valor crítico encontrado de $G = 6.500 \text{ Kg/h.m}^2$. en que comienza a producirse pulverización del agua, indicio de una excesiva velocidad del aire.

VI-4.

Estudio de Efectos finales.

Para evaluar la influencia de los efectos finales y estudiar su existencia se realizó una serie de experimentos con altura de relleno reducida (experimentos 104 á 110). Los resultados experimentales se reflejan en la Tabla XXXII donde además de los valores de los coeficientes volumétricos individuales obtenidos con altura de relleno reducida (ensayos 104 á 107), se indican los valores correspondientes de dichos coeficientes, calculados por las expresiones deducidas en los ensayos sistemáticos, o bien (valores entre paréntesis) los valores medios obtenidos en las mismas condiciones de operación y altura de relleno.

Las diferencias entre los valores obtenidos y los valores calculados (o medios) se indican asimismo en la Tabla XXXII, y en las Figuras 21, 25, 30, 34, 38, 40, 43 y 45 se han representado por EF los coeficientes obtenidos a altura de relleno reducida ($l = 0.212 \text{ m.}$) para compararlos con los resultados a altura normal de relleno ($l = 0.354$).

De estos resultados se deduce que en las condiciones normales de operación caracterizadas por velocidades másicas del aire inferiores á 6.500 Kg/h.m^2 , el dispositivo colector evita se produzcan efectos finales en el fondo de la torre si la velocidad másica del agua no es excesiva.

Se comprueba, en efecto, (experimento 107) que a caudales de mojado elevados los coeficientes individuales resultan muy distantes de los obtenidos sistemáticamente a altura normal de relleno.

Al no ser sistemáticos los efectos finales y ocurrir en condiciones extremas de operación no se prolongaron los experimentos para su determinación (por el método de Mc. Adams en forma de altura de relleno equivalente), indicándose en los resultados finales los márgenes entre los que las ecuaciones obtenidas se consideran válidas para el relleno en cuestión.

TABLA XXXII - Estudio de Efectos Finales.

Nº	L	G	k'a	k'a calc. (ó medio)	difª. %	h _{ga}	h _{La}	h _{La} calc. (ó medio)	difª %
104	0,212	4.220	4.370	16.000	15.000	+6,7	4.000	15.100	(19.500) (-22,5)
105	0,212	4.325	6.800	28.500	(25.400)	(+12,4)	7.000	18.800	(19.700) (-4,6)
106	0,212	8.060	4.350	16.700	16.500	+1,2	4.120	26.600	(34.500) (-22,9)
107	0,212	8.100	6.690	50.000	(30.000)	(+67,0)	12.000	20.000	(34.500) (-42,0)
108	0,354	4.385	4.250	15.500	14.600	+6,2	3.700	27.000	23.500 +14,9
109	0,354	4.385	6.745	26.600	(25.000)	+6,4	6.600	18.000	(20.000) (+10,0)
110	0,354	8.075	4.460	16.900	16.700	+1,2	4.200	40.000	38.700 +3,2

VI-5.

Comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los encontrados en la bibliografía.

Las ecuaciones representativas del valor de los coeficientes individuales deducidas por la presente investigación son las siguientes

$$k'a = 5.20 G^{0.80} L^{0.15} \dots \text{error } 10 \% \quad (57)$$

$$h_G a = 1.28 G^{0.80} L^{0.15} \dots \text{error } 10 \% \quad (58)$$

$$h_L a = 28.6 L^{0.8} \dots \text{error } 33 \% \quad (61)$$

La Tabla I resume las diferentes expresiones de los coeficientes individuales de transporte en procesos de interacción aire-agua encontradas por diversos autores. El estudio comparativo de dichas expresiones con las encontradas en la presente investigación muestra que:

1º.- Existe una razonable concordancia de resultados para la expresión del coeficiente $k'a$ entre los encontrados por Yoshida y Tanaka, Thomas y Houston, Masiá y los de esta investigación. Además la tendencia apreciada en ésta del aumento del exponente de G en la ecuación para $k'a$ al aumentar la velocidad másica del aire por encima de los valores normales de utilización concuerda con la incidencia estudiada por Cribb que deduce el exponente 1.5 para G en torres

de humidificación con alta velocidad del aire. El aparato y procedimiento experimental no permite alcanzar un alto grado de precisión en los resultados por lo que se han deducido para los exponentes de G y L valores intermedios entre los encontrados por los investigadores antes citados. No se ha podido deducir cuantitativamente influencia de las variables secundarias T , t y x sobre $k'a$.

2º.- El coeficiente h_{Ga} se ha deducido a partir de $k'a$ por la relación de Lewis.

3º.- Existe una mayor discordancia entre los resultados encontrados en esta investigación para el valor de la expresión para h_{La} y los encontrados por otros investigadores, debido principalmente al mayor error con el que se obtienen los valores de h_{La} , pero coincidiendo particularmente con la expresión propuesta por Yoshida y Tanaka para relleno de anillos Raschig. No se ha podido en nuestro caso deducir influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} , debido a la compacidad del relleno y a ser comparativamente altas las velocidades lineales del aire utilizadas, próximas al máximo práctico a partir del cual se produce pulverización del agua.

TABLA I - Resumen bibliográfico de las diferentes expresiones encontradas para los coeficientes individuales de transporte en procesos de interacción aire-agua.

$$\text{Coef.} = C \cdot G^n \cdot L^m \cdot f(j)$$

Coef.	AUTOR					
	Johnstone y Singh (16)	Mc.Adams y otros. (17)	Yoshida y Tanaka (18)	Cribb (19)	Thomas y Houston (14)	Masiá (15)
k'a	n		1.0	-	0.72	0.82
	m		0.2	-	0.26	0.12
	f(j)		-	-	-	f(t,x)
h _G .a	n	0.95	1.0		0.72	0.82
	m	-	0.2		0.26	0.12
	f(j)	-	f(t ^{superf})		-	f(t,x)
h _L .a	n		-	-	1.00	1.8
	m		0.8	1.5	0.51	1.0
	f(j)		-	-	-	f(x,T)
Tipo de relleno.	A.Ras- chig, 1"	A.Ras- chig 1"	A.Ras- chig	Ani- llos 4"	Rejas madera	Esferas- cilindros y rejas madera.

VII - C O N C L U S I O N E S
=====

VII - C O N C L U S I O N E S

=====

Las conclusiones a las que se ha llegado tras el desarrollo de la presente investigación pueden resumirse en las siguientes:

1ª) Las variables de operación que influyen sobre los coeficientes individuales de transporte implicadas en el diseño y proceso de las torres de enfriamiento de agua pueden clasificarse en dos categorías: variables principales y variables secundarias. Las variables principales son aquellas sobre las que el diseñador y el operador tienen posibilidad directa de acción: son las velocidades másicas del aire y del agua. Las variables secundarias son aquéllas que les vienen impuestas, (generalmente como condiciones límite) y sobre las que no tienen posibilidad de control voluntario: son las condiciones del aire (temperatura y humedad) y la temperatura del agua.

2ª) Se ha demostrado que estadísticamente, dentro de los intervalos usuales de operación de las variables secundarias, éstas no influyen sobre los coeficientes individuales de transporte: ni la humedad, ni la temperatura ni la entalpía del aire, ni la temperatura del agua ejercen influencia, sobre $k'a$, h_{Ga} ó h_{La} , dentro de los márgenes de error con que éstos se obtuvieron experimentalmente.

3ª) Se ha encontrado que sobre los coeficientes individuales de transporte en la fase gaseosa $k'a$ y h_{Ga} influyen las variables principales G y L . La influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ es unas cinco veces superior a la de L . Estadísticamente la ecuación que refleja la influencia de las variables principales sobre $k'a$ resulta ser (55)

$$\log k'a = 3.73 - 1.35 \times 10^{-5}L + \\ + (0.892 \times 10^{-4} + 0.439 \times 10^{-8}L)G,$$

que adopta la forma más simple siguiente (56)

$$\log k'a = 3.65 + (0.892 \times 10^{-4} + 0.439 \times 10^{-8}L)G$$

con una dispersión respecto a los resultados experimentales menor de $\pm 10 \%$. Sin embargo la expresión finalmente deducida para el relleno ensayado fué (57)

$$k'a = 5.20 \ G^{0.80} L^{0.15} \quad (\text{error menor de } \pm 10 \%)$$

válida en forma general para velocidades másicas del aire inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 .

4ª) Para el coeficiente h_{Ga} la expresión deducida fué

$$h_{Ga} = 1.28 \ G^{0.80} \ L^{0.15} \quad (\text{error menor de } \pm 10 \%) \quad (58)$$

5ª) La influencia de las variables principales sobre el coeficiente individual volumétrico de transmisión de calor a través de la fase líquida, h_{La} , se encontró que respondía estadísticamente a la forma compleja (59)

$$\begin{aligned} \log h_{La} = & 4.087 - 1.25 \times 10^{-5} G + \\ & + (0.860 \times 10^{-4} - 0.402 \times 10^{-8} G) L \end{aligned}$$

que adopta la forma más simple de (60)

$$\log h_{La} = 4.02 + 0.64 \times 10^{-4} L$$

con una dispersión respecto a los resultados experimentales menor de $\pm 33 \%$. La expresión final adoptada para el relleno ensayado fué (61)

$$h_{La} = 28.6 \ L^{0.8} \quad (\text{error menor de } \pm 33 \%)$$

que refleja la influencia de L sobre h_{La} a velocidades mási-

cas del aire inferiores a 6.500 Kg/h.m^2 , y la no influencia de G por estar en una zona próxima a la de pulverización por efecto de la velocidad del aire.

6ª) Las ecuaciones dadas son válidas para el relleno de película ensayado, a velocidades máxicas del aire y del agua comprendidas entre 3.000 y 6.500 Kg/h.m^2 , en que se evita la aparición de efectos finales por el colector dispuesto bajo el relleno y no se produce pulverización del aire y recirculación de gotas de agua, comprobándose visualmente que el relleno se encontraba totalmente mojado.

7ª) El método de Mickley utilizado para deducir el valor de los coeficientes de transporte a partir de los datos experimentales muestra la existencia de una resistencia a la transmisión de calor a través de la fase líquida no despreciable, a pesar de que el error en la determinación del coeficiente h_L sea 3,3 veces superior al que comporta el coeficiente $k'a$.

VIII - RECOMENDACIONES
=====

VIII - RECOMENDACIONES

=====

Primera. Proseguir con el programa completo de obtención de coeficientes volumétricos para todos los tipos de relleno contruídos estudiando en especial las múltiples disposiciones posibles que se pueden adoptar con un mismo elemento de relleno, funcionando como relleno de película o de goteo, variando la distancia entre listones, ángulo respecto a la vertical, distancia entre elementos además de las variables principales de operación G y L, con objeto de poder hacer un estudio comparativo en el que el factor económico sirva de criterio de selección, teniendo en cuenta el peso de relleno necesario por unidad de volumen, la pérdida de carga del relleno, etc.

Segunda. Para no limitar el uso del aparato experimental ya montado al ensayo de rellenos funcionando en régimen de película, que obligan a usar el colector especial utili-

zado en esta investigación, convendrá prescindir de él si es necesario y realizar los experimentos con diferentes alturas de relleno para poder deducir el valor de los efectos finales por el método de Mc. Adams.

IX - A P E N D I C E

IX - A P E N D I C E

IX-1.

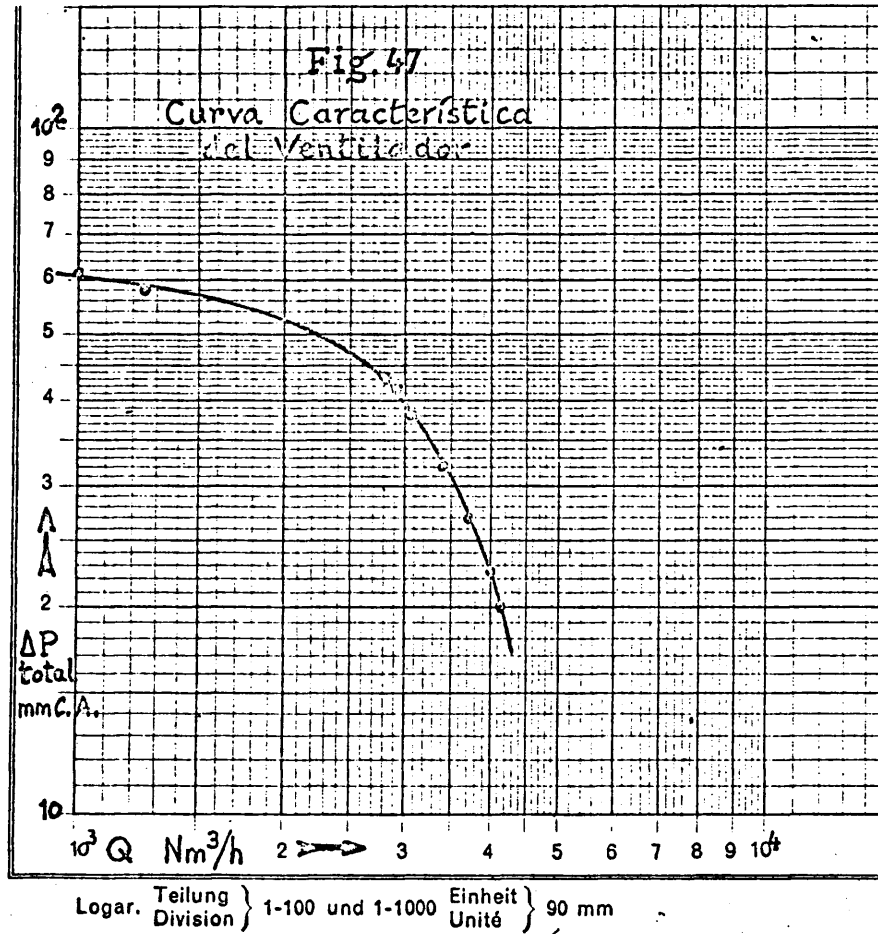
DETALLES DEL APARATO.

IX-1.1.

Prueba de capacidad del ventilador.

Para impulsar el aire al fondo de la torre de enfriamiento se instaló un ventilador centrífugo movido por un motor eléctrico de 3 C.V. a 1.450 rpm. que podía suministrar a la torre, a través del conducto de aire de 300 mm. de diámetro y el venturímetro medidor, un caudal máximo de 4.500 Nm³/h. para una presión de descarga de 15 mm.C.A. La curva característica del ventilador (Figura 47) se determinó para comprobar que éste era capaz de vencer la pérdida de carga del conducto de aire, con el enderezador de corriente, el venturímetro y la torre con su relleno y en funcionamiento normal, teniendo además la aspiración ligeramente estrangulada para poder tener aún un margen de regulación de caudal

al máximo ensayado en los experimentos que fué de unos 3.000 Nm³/h., correspondientes a 6.200 Nm³/h.m², es decir, unos 8.000 Kg/h.m². de aire seco. En esas condiciones de



caudal la pérdida de carga total del circuito de aire era de 40 mm.C.A. con la válvula de mariposa sin abrir completamente, comprobándose que el ventilador era capaz de mantener estables las condiciones de funcionamiento.

IX-1.2.

Medida del caudal de aire.

Para sistematizar las medidas del caudal de aire seco que se introducía en la torre de enfriamiento se siguieron los tres pasos siguientes:

1º. Cálculo de las dimensiones, forma y disposición del venturímetro en la conducción de aire.

2º. Cálculo del factor de corrección del venturímetro en función de las condiciones reales de presión, temperatura y humedad del aire.

3º. Calibrado del venturímetro mediante medidas múltiples puntuales transversas con tubo de pitot.

IX-1.2.1. Diseño y construcción del venturímetro: Para calcular las dimensiones del venturímetro se tuvieron en cuenta las siguientes bases: El diámetro interior de la conducción de aire se había fijado en 300 mm. a fin de tener una velocidad media de 10 m/sec a un caudal nominal de $2.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (el máximo utilizado en los experimentos fué de $3.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$). El error relativo de medida a un caudal próximo al mínimo utilizado de $1.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ no había de ser superior al 3 %, ocasionado por un error absoluto en la lectura manométrica de 1 mm.C.A. ($\pm 0,5 \text{ mm.}$). Esto supone una lectura manométrica de unos 16,5 mm.C.A. para el caudal de $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$, y al caudal nominal de

2.500 m³/h una lectura manométrica aproximada de 46,5 mm.

C.A. Las condiciones nominales de presión, temperatura y humedad del aire se establecieron como sigue: presión atmosférica, $\pi = 707$ mm.Hg; temperatura del aire, $t = 20^{\circ}\text{C}$; humedad relativa del aire, $\varphi = 0\%$ (aire seco).

El cálculo del venturímetro se hizo (siguiendo normas inglesas), para el caudal nominal de 2.500 m³/h y las condiciones de aire arriba indicadas, resultando, para $D = 300$ mm., un valor de $d = 179,1$ mm. y una expresión del caudal de aire en función de la diferencia manométrica de presiones en el venturímetro, como sigue:

$$M_G = 446 \cdot \sqrt{\Delta h_{\text{vent.}}} \cdot F \quad (62)$$

donde $[M_G] = \text{Kg. Aire seco/hora}$, $[\Delta h_v] = \text{mm.C.A.}$ y F es un coeficiente de corrección que depende de la presión, la temperatura y la humedad relativa del aire medido y que tiene el valor 1,000 para aire seco, a 20°C y 707 mm.Hg.

De acuerdo con las normas y los cálculos de construcción del venturímetro, éste se diseñó y fabricó según muestra la Figura 48.

que no resulta de aplicación práctica sencilla, por lo que se prefirió elaborar un ábaco de triple entrada para su determinación rápida en función de las condiciones del aire. Para ésto se realizó una serie de cálculos de su valor en diferentes condiciones de múltiple incidencia, que tabuladas convenientemente condujeron a obtener el ábaco de la Figura 49. Las tabulaciones se hicieron para las condiciones siguientes:

$$\pi = 697, 707 \text{ y } 717 \text{ mm. Hg.}$$

$$t = 0, 10, 20, 30 \text{ y } 40^{\circ}\text{C.}$$

$$\varphi, \text{ humedad relativa} = 0, 20, 40, 60, 80 \text{ y } 100 \%.$$

La utilización del ábaco es sencilla: en la parte inferior izquierda se arranca verticalmente desde la temperatura del aire t hasta encontrar el valor de la presión anteorificio π desde cuya intersección se sigue horizontalmente hasta encontrar el valor de la humedad relativa del aire φ desde donde se desciende hasta leer el valor buscado del factor de corrección F .

IX-1.2.3. Calibrado del venturímetro: Debido a que las dimensiones de la terraza disponible para instalar el aparato experimental obligaron a montar una conducción de aire excesivamente corta entre la salida del ventilador y el venturímetro

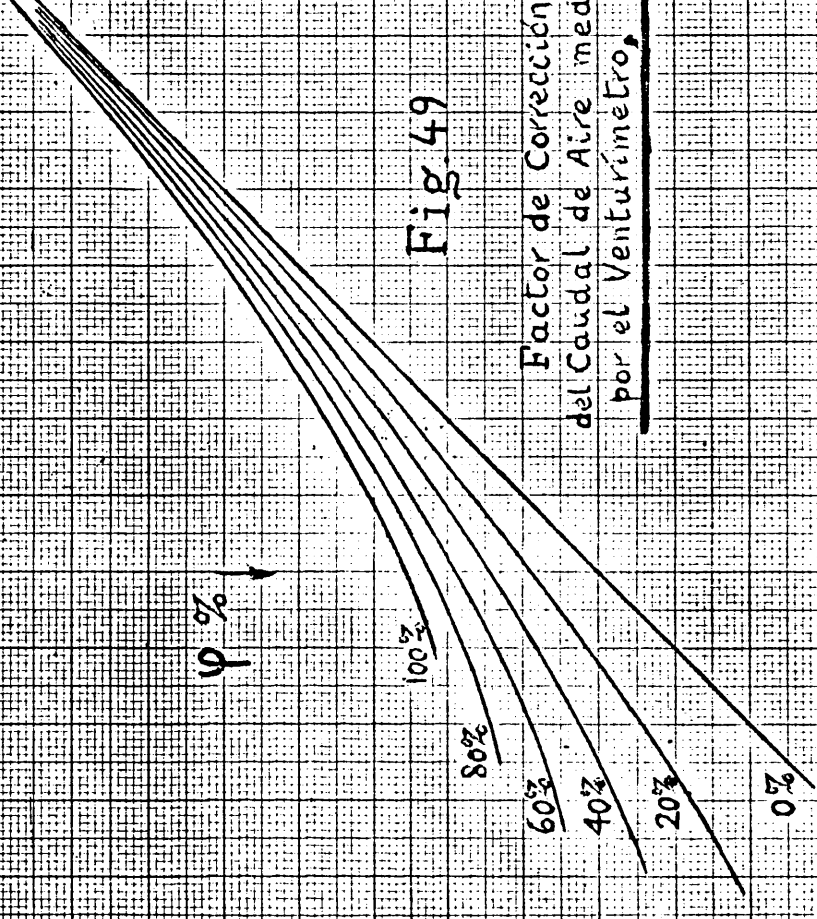
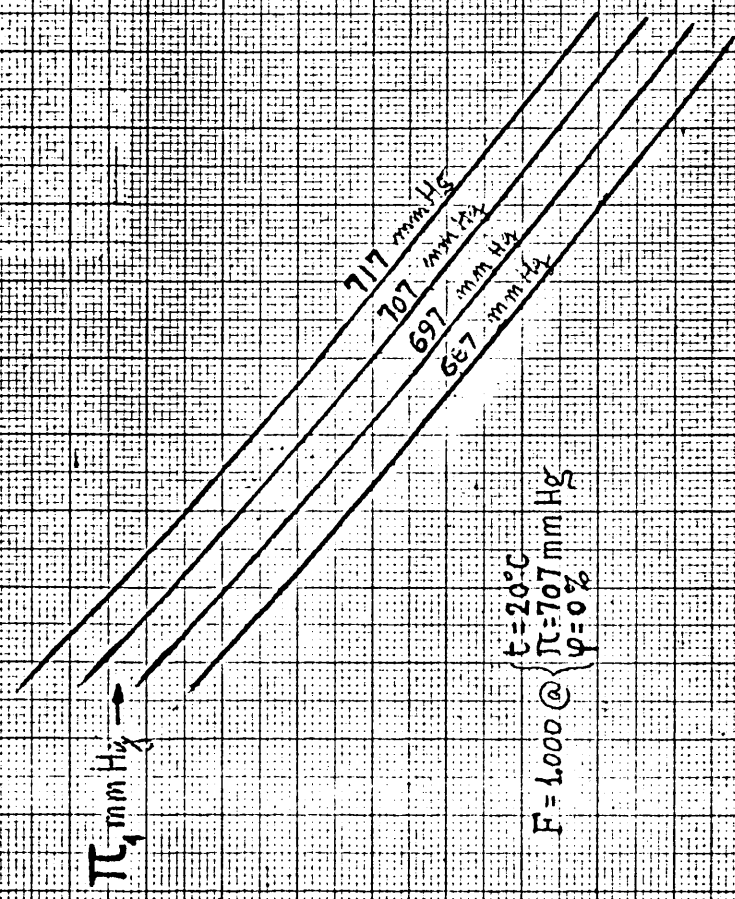


Fig. 49

Factor de Corrección
del Caudal de Aire medido
por el Venturímetro,

tro, esta distancia no cumplía con los mínimos de las normas de montaje. Estas normas exigen un mínimo de 20 diámetros (6 m.) entre el último elemento perturbador del flujo y el venturímetro, cuando el elemento es un codo ó una T, pero que deben aumentarse hasta 30 diámetros si el elemento perturbador es una válvula de estrangulamiento. Por tanto en nuestro caso habría sido necesario disponer como mínimo de 40 diámetros de tubería recta antes del venturímetro debido a la gran turbulencia causada directamente por el ventilador en su impulsión.

Un primer tanteo a base de medidas puntuales transversas con tubo de Pitot mostró en efecto una distribución de velocidades muy irregular, con máximos notables muy cerca de las paredes de la conducción cilíndrica y una amplia zona de mínima velocidad hacia el centro. Esta distribución sólo podía ser explicada por un desplazamiento del aire en espiral muy acentuada causado por la proximidad del ventilador centrífugo de impulsión y la existencia de una sola aspiración axial en el mismo. A fin de paliar este efecto, muy nocivo para la exactitud y reproducibilidad de las medidas, fué necesario instalar un elemento enderezador de corriente a la salida del ventilador centrífugo y proceder al calibrado total del venturímetro posteriormente.

El elemento enderezador de corriente, consistía en un conjunto de ocho chapas metálicas entrecruzadas, cuatro verticales y cuatro horizontales, paralelas al sentido de flujo del aire, formando un retículo con espacios prismáticos de base cuadrada de 5x5 cm. como máximo y una longitud de unos 45 cm. A su paso por los espacios prismáticos el aire se subdividía en múltiples elementos de flujo paralelos con el resultado de perder su desplazamiento global en espiral (este desplazamiento en espiral antes de colocar el enderezador de corriente se pudo comprobar experimentalmente también en forma visible por su acción rotatoria sobre una placa mantenida frente al flujo de aire y libre de girar).

Una vez instalado el enderezador, se procedió al calibrado del venturímetro en toda la gama de caudales de utilización. Comparando los resultados de este calibrado con los obtenidos antes de poner el enderezador se observó que el flujo de aire era mucho más homogéneo que antes, aunque persistía un ligero movimiento en espiral, habiéndose eliminado los acusados máximos cerca de ambas paredes del conducto. El caudal de aire se medía con el tubo de Pitot utilizando la fórmula

$$M_G = 1,194 \cdot \sqrt{\Delta h_p} \cdot F \quad (64)$$

TABLA XXXIII

Calibrado del Venturímetro

Venturímetro				Pitot (trasversas múltiples)	
Medi- da núm.	Δh_v mm.C.A.	$\sqrt{\Delta h_{Vent.}}$	M_G/F cal- cula- do.	$\sqrt{\Delta h_{Pitot}}$	M_G/F medi- do.
1	113	10,63	4.750	3,74	4.475
2	96	9,80	4.375	3,48	4.160
3	83,5	9,15	4.075	3,275	3.910
4	70,5	8,40	3.750	3,02	3.610
5	60,5	7,78	3.470	2,81	3.360
6	50	7,08	3.155	2,58	3,080
7	38	6,17	2.750	2,23	2.665
8	35,5	5,96	2.660	2,135	2.550
9	23,5	4,85	2.165	1,785	2.135
10	16	4,00	1.785	1,455	1.740
11	11	3,32	1.480	1,215	1.455

5000

A

DE

 $\phi 30 - 17 \text{ mm.}$ $t = 0^\circ\text{C}$ $\pi = 0.7$ $\psi = \%$ $= 6 \Delta h$

Característica r al

4000

 $\frac{M_G}{F}$

A

3000

2000

1000

0

0

0.2

4

0.6

0.8

1

1.4

6

18

2

4

2.8

3

3.2

3.4

6

 $\sqrt{\Delta h_{\text{Pitot}}}$ [mm] $\sqrt{\Delta h_{\text{Vent.}}}$ [mm CA]^{0.5}

EXAMEN DE INGENIERIA

La Tabla XXXIII resume los resultados experimentales de calibrado del venturímetro con el tubo de Pitot. Como puede observarse existe una ligera desviación sistemática entre los puntos correspondientes a lecturas de caudal de aire medidas con el venturímetro si se utiliza la fórmula deducida de la construcción y montaje normalizado de éste, y la deducida por calibrado con el tubo de Pitot con transversas múltiples. Esta desviación es más acentuada a caudales grandes de aire en que el efecto espiral del torbellino se acentúa. En las lecturas del venturímetro este efecto se acusa, pero no en el tubo de Pitot que permite medir caudales reales aunque exista una pequeña turbulencia espiral.

Mediante esta calibración se construyó la gráfica de la Figura 50 que relaciona las lecturas del venturímetro con el valor M_G/F . El caudal de aire se obtiene multiplicando este valor por el factor de corrección F .

IX-1.3.

Medida del caudal de agua.

Para medir el caudal de agua que alimentaba la torre de enfriamiento por su parte superior se instaló una placa de orificio entre dos bridas mecanizadas intercaladas en la tubería ascendente de agua, y situadas a 22 diámetros de la válvula de regulación de caudal. Dos tomas de presión se

dispusieron en la tubería antes y después de la placa de orificio y a distancias normalizadas. Estas tomas de presión se conectaron con el manómetro de mercurio de tubo vertical en U situado en el panel de instrumentos, a través de unas cámaras decantadoras de vidrio con su ventilación y drenaje correspondientes destinadas a recoger la suciedad, óxido y otras partículas que pudieran pasar por los tubos de conexión, con objeto de mantener limpias las ramas del manómetro diferencial de mercurio y evitar depósitos de suciedad sobre la interfase mercurio/agua, que dificultaría las lecturas manométricas. La placa de orificio se construyó con chapa de aluminio de 5 mm. de espesor, mecanizándose según normas. La placa encajaba en los rebajes de las bridas portaplacas, consiguiéndose un cierre estanco mediante la presión de los tornillos de sujección.

El diámetro del orificio, siendo la tubería de $1\frac{1}{2}$ " (41,5 m.) se calculó para un determinado caudal máximo de agua de alimentación a la torre.

El caudal máximo utilizado en los primeros experimentos de tanteo fué de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ($2,78 \text{ l}/\text{sec}$) resultando un orificio de 24,3 mm. para una diferencia manométrica en el manómetro de mercurio de 350 mm.Hg. Este caudal máximo resultaba excesivo para la gama de caudales de agua a ensayar, y al caudal mínimo de $1.480 \text{ Kg}/\text{h}$. correspondía una lectura ma-

nométrica demasiado pequeña. Se fijó pues como caudal máximo de trabajo el de 5.800 Kg/h (12.000 Kg/h.m^2) para el que se admitía una lectura manométrica de unos 300 mm.Hg., resultando para el caudal mínimo una lectura de unos 19 mm.Hg. Vuelto a calcular el diámetro del orificio para obtener las lecturas indicadas resultó un valor de 19,2 mm.

El calibrado de los diafragmas se realizó mediante medida del peso de agua P impulsado a través del diafragma en un tiempo determinado t. Para realizar esta operación se mantenía un nivel suficientemente alto en el depósito inferior a fin de no correr peligro de llegar a aspirar aire durante cada medida. El agua se enviaba durante el tiempo controlado t a un depósito exterior colocado sobre una báscula. El peso P de agua recogido en ese tiempo permitía conocer el gasto másico de agua impulsado a través del diafragma medidor para la correspondiente presión diferencial manométrica. Un observador vigilaba el manómetro y mantenía la constancia del caudal durante las medidas, mediante la válvula de regulación. Otro operador, provisto de cronómetro, se encargaba de enchufar y desenchufar rápidamente a la tubería de salida de agua al distribuidor de la torre (estando cerrada una de las dos ramas de la T de alimentación al distribuidor), una manguera flexible que vertía en el depósito exterior situado sobre la báscula. Este operador se encargaba de registrar el tiempo t que había estado vertiéndose el agua

TABLA XXXIV

Calibrado del Diafragma para medida del caudal
de agua.

Me- di- da núm.	Δh_L mm.C.Hg	$\sqrt{\Delta h_L}$	Peso de agua medido, Kg.	Tiempo medida, seg.	Caudal Kg/h
1	12,0	3,46	24,0	75,0	1.150
2	12,0	3,46	29,4	90,0	1.175
3	16,0	4,00	23,6	65,0	1.305
4	20,2	4,49	36,3	90,0	1.450
5	20,2	4,49	46,4	110,0	1.520
6	21,0	4,58	24,9	60,0	1.495
7	21,0	4,58	38,2	90,0	1.530
8	28,0	5,29	29,2	60,0	1.750
9	36,0	6,00	50,7	90,0	2.030
10	39,8	6,31	47,5	80,0	2.140
11	39,8	6,31	58,6	100,0	2.110
12	45,0	6,51	33,9	55,0	2.220
13	45,0	6,51	55,6	90,0	2.220
14	55,0	7,41	36,4	55,0	2.380
15	66,5	8,15	67,2	90,0	2.690
16	79,5	8,91	49,2	60,0	2.950

... / ...

TABLA XXXIV (Continuación)

... / ...

17	80,5	8,97	57,5	70,0	2.960
18	80,5	8,97	74,2	90,0	2.970
19	93,5	9,66	43,9	50,0	3.160
20	93,5	9,66	71,0	80,0	3.190
21	110,0	10,49	43,1	45,0	3.450
22	110,0	10,49	63,9	70,0	3.290
23	138,0	11,73	48,8	46,0	3.820
24	140,8	11,87	64,7	60,0	3.880
25	140,8	11,87	87,3	80,0	3.930
26	158,0	12,57	45,8	40,0	4.120
27	158,0	12,57	68,7	60,0	4.120
28	180,5	13,42	43,0	35,0	4.420
29	204,0	14,27	44,9	35,0	4.610
30	204,0	14,27	46,7	34,7	4.850
31	204,0	14,27	45,6	34,7	4.730
32	204,0	14,27	78,0	60,0	4.680
33	217,0	14,72	80,9	60,0	4.850
34	217,0	14,72	93,7	70,0	4.820
35	230,0	15,16	41,5	30,0	4.980
36	258,0	16,05	44,7	30,5	5.280
37	258,0	16,05	87,7	60,5	5.220
38	296,0	17,20	78,0	50,0	5.620
39	296,0	17,20	93,3	60,0	5.600

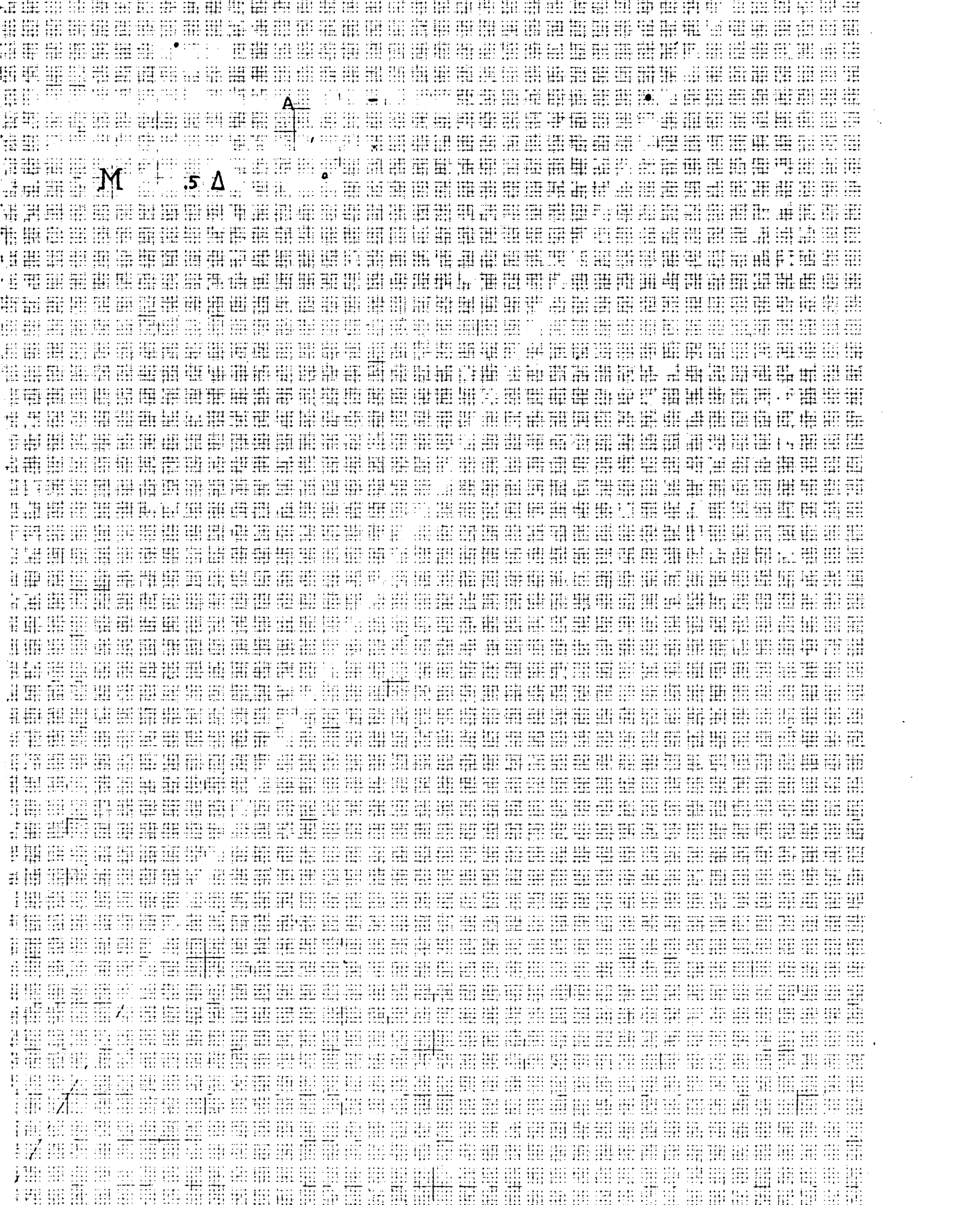
en el depósito.

La Tabla XXXIV muestra los resultados obtenidos durante el calibrado del diafragma. Dichos resultados se alineaban estadísticamente a lo largo de la línea

$$\begin{array}{ccc} M_L = 328,5 & \cdot & \sqrt{\Delta h_L} \\ \text{[Kg/h]} & & \text{[mm.Hg]} \end{array} \quad (65)$$

Para el intervalo de temperaturas en que se había de trabajar, de 20 á 40°C, no se incluyó ningún factor de corrección de densidad puesto que dicho factor sería muy inferior al error básico de lectura del procedimiento de calibrado.

El calibrado del diafragma se comprobó un par de veces durante los meses en que se hicieron los experimentos, a fin de asegurarse de su constancia en el tiempo: para ésto sólo se tomaban dos o tres puntos del intervalo normal de caudales para comprobar si seguían alineados en la línea de calibrado.



A

M

5 Δ

5

10

→ $\sqrt{\Delta h_L}$ [mmHg]^{0.315} "EXAKTOR" MARCA REGISTRADA

IX-1.4.

Medida de temperaturas. Calibrado de los termómetros.

Tanto para las medidas de temperatura de aire y agua como para la determinación de la humedad del aire por psicrometría se utilizaron termómetros de bulbo de mercurio, marca Protón, con escala de -5°C a 50°C , dividida en grados y décimas de grado, en los que podía precisarse la lectura de $0,05^{\circ}\text{C}$ con seguridad.

El calibrado de fábrica de estos termómetros se comprobó que no era exacto y daba una precisión menor de la que se deseaba, por lo que fué necesario calibrar todos los termómetros contrastándolos frente a dos termómetros patrones de diferente fabricante y construcción, pero para los que se tenían las correspondientes curvas de calibrado con precisión superior a $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. El calibrado se hizo de cuatro en cuatro termómetros, disponiéndolos junto con los dos patrones en un soporte adecuado, quedando los dos patrones en los extremos y los cuatro a calibrar en el centro. El conjunto se sujetaba convenientemente sobre un termostato de calidad con una abertura suficiente para introducir el conjunto de termómetros en el agua hasta sumergir el bulbo de todos ellos unos 5 cm. Partiendo de agua fría mantenida a baja temperatura con hielo se calibraba la zona de temperaturas bajas (de 4 a 11°C) y luego se calentaba progresivamente. Las medidas se realizaban siempre una vez alcanzado el régimen estacio-

LI D

s 6

6.48

6.3

t_{2f}

1 5 9

2f 7 4 7

w

5

T₁₂

1 5 20

tw2

35027

a bien e

3 03

Δt m u a a a em marc a po e me r

m rest r d

c

.10°

15

20

25

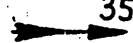
30

35

40

45

50



temp. leida, °C

N. 30 EXAKTOR MARCA

rio de temperatura, para los seis termómetros a la vez.

Las curvas de calibrado resultantes se muestran en las Figuras 52 y 53, y se utilizaban después de cada experimento para corregir las temperaturas leídas. En cada curva de calibrado se indica la posición o medida a la que se destinó cada uno de los termómetros.

IX-1.5.

Medida de la humedad del aire.

IX-1.5.1. Procedimientos de medida de la humedad: La necesidad de medir la humedad del aire exactamente, de la forma operativa más simple posible y sin necesidad de utilizar procedimientos costosos llevó a realizar un estudio amplio de los métodos disponibles existentes de medida.

En orden de simplicidad, los principios utilizados para la medida de la humedad del aire son los siguientes:

1. Higrómetros de cabello.
2. Psicrómetros de termómetro seco y húmedo.
3. Determinación de la temperatura de rocío.
4. Higrómetros conductimétricos.
5. Higrómetros electrolíticos por conductimetría o colum-

bimetría de sales fuertemente higroscópicas.

6. Higrómetros electrolíticos con determinación de la temperatura de rocío.

7. Higrómetros por medida de calores de absorción/desorción de humedad sobre sales higroscópicas.

IX-1.5.1.1. Higrómetros de cabello: Son aparatos para medida de la humedad relativa del aire de uso muy extendido por la simplicidad de su principio, cuando no se requieren grandes precisiones. Se basan en las diferencias de longitud que experimenta un cabello al ser expuesto a un ambiente de humedad relativa variable. Dentro de un cierto margen de temperaturas del aire la relación entre la longitud del cabello y la humedad del aire es biunívoca, de forma que puede obtenerse directamente en una escala apropiada (no lineal por supuesto) el valor de la humedad relativa del aire.

Por el hecho de medir humedades relativas y no absolutas, para obtener mediante las lecturas de un higrómetro de cabello valores de la humedad absoluta del aire, es necesario conocer también la temperatura del aire, con cuyos dos valores, y el de la presión atmosférica puede, obtenerse, con las tablas psicrométricas, el valor de la humedad absoluta: existen en el mercado, además de los higrómetros sencillos de cabello, los llamados termohigrómetros que encierran en el mis-

mo aparato un higrómetro de cabello y un termómetro bimetálico de esfera.

A temperaturas medias de aire del orden de 25°C la máxima precisión que puede obtenerse de un termohigrómetro es de 0,00020 Kg. vapor de agua/Kg. aire seco. El inconveniente fundamental es la falta de reproductibilidad del instrumento, ya que la exactitud sería admisible, pues estando bien calibrado no hay gran diferencia de exactitud absoluta en las medidas a humedades altas o bajas.

Por otro lado, es un tipo de aparato que no se presta con facilidad a medidas continuas de humedad de corrientes de aire.

IX-1.5.1.2. Psicrómetros de termómetro seco y húmedo: Los psicrómetros son los aparatos más universalmente utilizados para medida de la humedad del aire de una forma exacta y sencilla. Tienen la gran ventaja sobre los higrómetros de cabello de la buena reproducibilidad de sus resultados, con tal que se cumplan ciertas condiciones de aislamiento frente a radiaciones, velocidad de paso del aire por el pabito del termómetro húmedo y seguridad de que éste se encuentra totalmente húmedo. Además, su exactitud, que depende fundamentalmente de la exactitud de las lecturas termométricas, es entre 4 y 5 veces superior a la de los termohigrómetros: a 25°C y con termó-

metros de décima de grado (error menor de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$) pueden conseguirse precisiones de 0,00005 Kg. vapor de agua/Kg. aire seco. Es fundamental para alcanzar estas precisiones, aislar perfectamente ambos termómetros de las radiaciones externas, conservar el pabito húmedo y con agua a una temperatura lo más parecida posible a la húmeda del aire, y mantener una velocidad de paso del aire por el pabito de 5 m/sec ($\pm 0,5$ máx.) a fin de poder utilizar como datos psicrométricos las curvas de saturación adiabática del aire a la presión de trabajo reinante. Esa velocidad del aire se puede conseguir con un pequeño ventilador que aspira el aire y lo fuerza a pasar por el pabito del termómetro húmedo. En meteorología se emplean frecuentemente los llamados Aspiropsicrómetros (Assmann), en que la velocidad del aire es de 2,5 m/seg, y los psicrómetros estáticos (August) en los que el paso del aire junto al pabito húmedo se consigue por simple convección natural, $v \approx 0,8$ m/seg. Para cada tipo de psicrómetro existen tablas psicrométricas adecuadas a la velocidad de paso del aire junto al pabito del termómetro húmedo, llamadas tablas aspiropsicrométricas en el caso de los psicrómetros Assmann.

IX-1.5.1.3. Determinación de la temperatura de rocío: Este procedimiento es de una exactitud y reproducibilidad comparables al método psicrométrico, teniendo sobre él la ventaja de relacionar directamente la humedad del aire con su temperatura de saturación adiabática como propiedad termodinámica simple.

El procedimiento experimental necesario para determinar la temperatura de rocío de una muestra gaseosa no es complicado pero no se adapta a medidas de tipo continuo. Existen procedimientos tales como los higrómetros electrolíticos descritos más adelante, que indirectamente miden la humedad del aire obteniendo relaciones entre otras propiedades medibles y la temperatura de rocío.

IX-1.5.1.4. Higrómetros conductimétricos: Basándose en que la conductividad eléctrica varía con la humedad relativa, hay sistemas prácticos de medida que permiten obtener la humedad relativa del aire con una exactitud mejor del $\pm 2 \%$, a temperatura constante. Se emplean en aquellos casos en que no es necesaria gran precisión por la aceptable reproducibilidad de sus resultados. Son sin embargo sensibles a la presencia de impurezas ácidas o básicas en el aire. Existen en la industria aparatos medidores de la humedad relativa según este procedimiento y con dispositivos compensadores de la temperatura del aire. Se utilizan para ambientes limpios y permiten medir humedades entre 5 y 95 % a temperaturas comprendidas entre 5 y 50°C, mantenidas constantes.

IX-1.5.1.5. Higrómetros electrolíticos para conductimetría o columbimetría de sales fuertemente higroscópicas: Se basan en la proporcionalidad existente entre la humedad del aire y la cantidad de electricidad que pasa por una célula elec-

trolítica que contiene una sal fuertemente higroscópica. Cuando la humedad del aire es nula, la sal se encuentra completamente seca y no deja pasar corriente a su través. Al haber humedad alrededor de la sal, ésta tiende a absorberla produciéndose un electrolito sobre la sal que conduce la electricidad y origina la electrolisis del agua absorbida, tendiendo así a secarse de nuevo y por tanto a regenerarse. A una determinada humedad del aire se establece un equilibrio entre la humedad absorbida y la electrolizada, siendo proporcional la corriente a la humedad del ambiente.

Aparatos según este principio existen en el mercado y permiten detectar cantidades muy pequeñas de humedad, del orden de 5 ppm. La casa Consolidated Electrodynamics Co. fabrica higrómetros de este tipo. Su coste es elevado y requieren comprobaciones y calibrados periódicos.

IX-1.5.1.6. Higrómetros electrolíticos para determinación de la temperatura de rocío: El principio se basa en la relación existente entre la temperatura de rocío de un gas y la temperatura t a la que es necesario poner una solución sobresaturada de una sal higroscópica para obtener sobre esa solución una presión parcial de vapor de agua correspondiente a la temperatura de rocío del gas. Como esta relación sólo depende de las propiedades de la sal considerada, es posible, conociendo t , conocer la temperatura de rocío del gas. Para constituir

el higrómetro es necesario pues realizar un sistema que permita calentar una solución de una sal (cloruro de litio) hasta la temperatura de equilibrio, mantener la solución a esa temperatura y medirla exactamente. El calentamiento de la solución y el equilibrio de temperatura se consigue suspendiendo la solución en una vaina de lana de vidrio y pasando por ella una corriente eléctrica alterna que calienta la solución y pierde conductividad al perder humedad, por lo que tiende a equilibrar el sistema a una temperatura t proporcional a la de rocío del gas húmedo circundante. La temperatura t se mide mediante un termómetro de resistencia colocado en el interior de la vaina. Este sistema es menos exacto que el psicrométrico pues da precisiones máximas de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ de la temperatura de rocío. La velocidad del aire debe ser pequeña y no superior a $0,5 \text{ m/sec}$. El sistema es costoso y exige calibraciones periódicas. El elemento sensible lo es además en exceso frente a perturbaciones de diversa índole.

IX-1.5.1.7. Higrómetros por medida de calores de adsorción/desorción de la humedad sobre sales higroscópicas: La casa americana Mine Safety Appliances Company fabrica un tipo de higrómetro de gran exactitud, utilizado incluso en la industria para medir concentraciones muy bajas de humedad en gases y que funciona por un principio basado en la medida de la energía calorífica intercambiada cuando un gas se adsorbe

o desorbe en la superficie de un sólido adsorbente. Este método se indica que parece ser más adaptable para medidas continuas y registro de las mismas que otros procedimientos como el higrómetro de cabello, el psicrómetro de termómetros seco y húmedo y los higrómetros de conductimetría con sales higroscópicas. Este principio y aparato se utilizan con éxito para medir bajas concentraciones de humedad, y es exacto en escalas del instrumento comprendidas entre 0 y 20 ppm. Su coste es elevado.

IX-1.5.2. Elección, diseño, construcción y comprobación de los psicrómetros: Después de tener en cuenta los diferentes posibles sistemas e instrumentos descritos para medida continua de la humedad del aire a la entrada y a la salida de la torre de enfriamiento, se decidió utilizar el método psicrométrico que es el que reunía en conjunto las mayores ventajas en cuanto a exactitud, reproducibilidad, facilidad de utilización y coste. Tiene como más característica la ventaja de que no necesita calibrados periódicos siempre que se asegure el cumplimiento de determinadas condiciones de trabajo que pueden resumirse como sigue:

1. El aire debe pasar alrededor del pabito del termómetro húmedo a una velocidad lo más próxima posible a 5 m/sec.

2. El psicrómetro debe ser construido de forma que los

termómetros estén protegidos de efectos térmicos exteriores debidos a convección o radiación.

3. El pabilo debe ser de tejido ligero y rodear completamente el bulbo del termómetro húmedo a fin de mantener una película continua de agua sobre el bulbo de mercurio.

4. El agua debe ser destilada y pura y ha de suministrarse al pabilo a una temperatura lo más próxima posible a la temperatura húmeda del aire.

5. El pabilo debe cubrir no sólo el bulbo de mercurio sino también una parte suficiente de la varilla termométrica para eliminar cualquier error debido a conducción térmica de la varilla al bulbo.

El diseño de los psicrómetros empleados se hizo teniendo en cuenta todos los puntos anteriores, las recomendaciones del "Cooling Tower Institute" sobre su construcción y otros diseños prácticos existentes modificados para cumplir con las condiciones antes indicadas. La Figura 9 (pág. 60) muestra como se construyeron los psicrómetros. A fin de comprobar el buen aislamiento térmico de conjunto de los psicrómetros, se realizaron pruebas de puesta en marcha súbita y parada súbita del aire aspirado, para determinar la rapidez de respuesta de los psicrómetros y su inercia a volver a alcanzar la temperatura ambiente.

Además de cuidar especialmente la protección contra la radiación se aseguró el que la sección libre de paso del aire entre el tubo y el pabito de los dos termómetros húmedos fuera igual en los dos psicrómetros seleccionando aquellos termómetros que tenían dimensiones de bulbo y varillas iguales. De esta forma se aseguraba el paso de igual cantidad de aire por los dos psicrómetros. Dicha sección y la velocidad de paso de 5 m/sec. a conseguir determinaban el caudal de la muestra de aire a aspirar por los psicrómetros.

El sistema de medida de humedades comprendía dos tomas de muestra, dos psicrómetros independientes y una instalación común para aspiración y medida del caudal de muestra.

La muestra del aire de entrada a la torre se tomaba directamente por una conexión hecha en la conducción de aire próxima a la base de la torre y se conducía por un tubo de vidrio al psicrómetro número 1 donde pasaba primero por el termómetro seco e inmediatamente después por el termómetro húmedo saliendo luego del psicrómetro hacia el circuito común de aspiración.

La muestra de aire a la salida de la torre se tomaba en dos puntos distintos situados aproximadamente medio metro por encima del distribuidor de agua sobre el relleno de la torre, a fin de conseguir que la muestra de aire fuera más representativa que si sólo se tomase en un punto, con lo que se reducían gran parte de los errores debidos a deficiente distribución del aire por el relleno. Los dispositivos empleados para hacer pasar muestras representativas de aire por el psicrómetro número 2 o de salida, tenían como misión hacer que las muestras de aire no arrastraran partículas de agua a la conducción y al psicrómetro. Para ésto se dispusieron placas desviadoras convenientemente, una situada debajo de la entrada de la muestra y otras dos más amplias, situadas en las partes inferior y superior del dispositivo, para impedir que las gotas de agua, al depositarse sobre la caperuza de toma de muestra afectaran, al enfriarse. por el aire, a la temperatura de la muestra de aire, antes de que ésta pasase por el termómetro correspondiente; este termómetro indicaba la temperatura del aire a la salida de la torre y está situado en la caperuza de toma de muestra. La Figura 8 (pág. 59) muestra la realización de este dispositivo.

Las dos muestras de aire de salida se reunían y pasaban por una conducción a través de la pared de la torre de enfriamiento hacia el psicrómetro núm. 2.

Un hecho que simplificaba la instalación de tomas de muestra era el que la corriente continua de muestra, aunque sufra algún calentamiento (o enfriamiento) entre el punto de toma y el psicrómetro de medida, no varía por eso de humedad absoluta (que es la que se trata de determinar) mientras se mantenga alejada de la saturación, por lo que las lecturas del termómetro seco y húmedo dan siempre la medida correcta de esa humedad absoluta. Era necesario, naturalmente, que si lo que le ocurría a la muestra era un enfriamiento, ésta no se llegara a saturar (alcanzar la temperatura de rocío) ya que la lectura indicaría la humedad absoluta de aire saturado a la temperatura a la que ha llegado la muestra, que ya no sería correcta al haber perdido humedad al sobresaturarse. Por esta razón era incluso beneficioso el que la temperatura ambiente fuera superior a la del aire a la salida de la torre, pues el único efecto que podría ocurrir era su calentamiento y esto alejaba el peligro de sobresaturación. Precisamente el termómetro para medir la temperatura ambiente se colocó fuera de la torre y junto a la conducción flexible y transparente de toma de muestra, para poder apreciar posibles condensaciones en la línea.

Después de pasar por cada psicrómetro las muestras de aire se unían y pasaban al circuito común de aspiración. Una llave cónica de tres direcciones permitía, cuando era necesario, tomar muestra a través de cada uno de los psicróme-

tros individualmente, seleccionando la posición adecuada de la llave. El circuito común de aspiración constaba de un grupo motobomba de vacío formado por una bomba rotativa aspirante de núcleo asimétrico y paletas, movida por un motor eléctrico de 1 C.V. á 750 rpm. a través de una transmisión de correas. La bomba se revisaba periódicamente añadiendo aceite al cierre. El conducto de aspiración estaba conectado con el resto del circuito a través de un depósito decantador destinado a retener posibles gotas de agua arrastradas por el aire de muestra para que no pasaran a la bomba de vacío. El conducto de aspiración entre el depósito decantador y la llave de tres direcciones para conexión con los psicrómetros, llevaba intercalados una comunicación al exterior con válvula de regulación de asiento cónico, un sistema de llaves de desviación o "by-pass" y una conexión a un manómetro diferencial de rama en U abierta.

La bomba volumétrica de vacío era de caudal constante y por tanto el caudal de aire de muestra aspirado se regulaba a base de la cantidad de aire aspirado directamente del exterior. Para medir y regular la cantidad de aire de muestra aspirado se intercaló un contador de gas, en serie con el circuito de aspiración, cerrando el paso normal y desviando el aire de muestra por el contador mediante el juego de llaves de by-pass.

Una vez instalados los psicrómetros en posición de funcionamiento normal, se abría completamente la llave de aspiración directa del exterior y se ponía en marcha la bomba de vacío. Cronometrando la cantidad de aire aspirado a través de los psicrómetros por medio del contador de gas, se iba cerrando la llave de aire aspirado directamente del exterior, con lo que aumentaba el aire aspirado por los psicrómetros. La operación proseguía hasta que la cantidad de aire aspirado a través de los psicrómetros era la deseada, anotándose entonces la diferencia de presión del vacuómetro colocado antes del sistema de llaves y contador de gas. El contador de gas se desmontaba, cerrándose las llaves de entrada y salida y abriéndose la de paso directo. En operación normal, para establecer el caudal deseado de aire aspirado por los psicrómetros, sólo era necesario graduar con la válvula de regulación la cantidad de aire aspirado directamente del exterior hasta conseguir en el vacuómetro el mismo vacío controlado durante el calibrado con el contador de gas. Cuando era necesario cambiar el juego de termómetros húmedos de los psicrómetros, o los pabilos, se volvía a calibrar el sistema determinando el vacío necesario para conseguir mantener a 5 m/sec. la velocidad de paso del aire de muestra por los termómetros húmedos.

IX-1.5.3. Datos psicrométricos. Corrección por la presión:

Los datos psicrométricos que se utilizaron como base para la determinación de la humedad absoluta del aire con los psicrómetros fueron los de saturación adiabática, mediante la figura 54 correspondiente a la presión atmosférica de 760 mm.Hg. Los datos directos obtenidos con esta gráfica en forma de humedad absoluta era necesario corregirlos sistemáticamente para la presión reinante en el interior del psicrómetro en el momento de la lectura. Para sistematizar esta corrección se tenía en cuenta que, debido al pequeño vacío provocado en los psicrómetros al aspirar el aire de muestra, la presión en el interior de los mismos era 23 mm. C.A. inferior a la presión atmosférica, por lo que la corrección de presión debía hacerse para una presión igual a la atmosférica reinante en el momento de las lecturas disminuída en 1,7 mm.Hg.

Para facilitar la corrección de la humedad absoluta por la presión se elaboró una gráfica en la que tomando los datos de la temperatura húmeda leída y la presión en el interior del psicrómetro se obtenía directamente la corrección de humedad absoluta a aplicar a la deducida de los datos psicrométricos a 760 mm.Hg, de la figura 54.

La gráfica de corrección obtenida, figura 55, se determinó por puntos calculando la corrección necesaria para las presiones de 680, 690,, 740 y 750 mm.Hg y

$1^{\circ}\text{F} = 0,555^{\circ}\text{C}$

Presión: 760 mm.Hg.

$1^{\circ}\text{C} = 1,8^{\circ}\text{F}$

Fig. 54

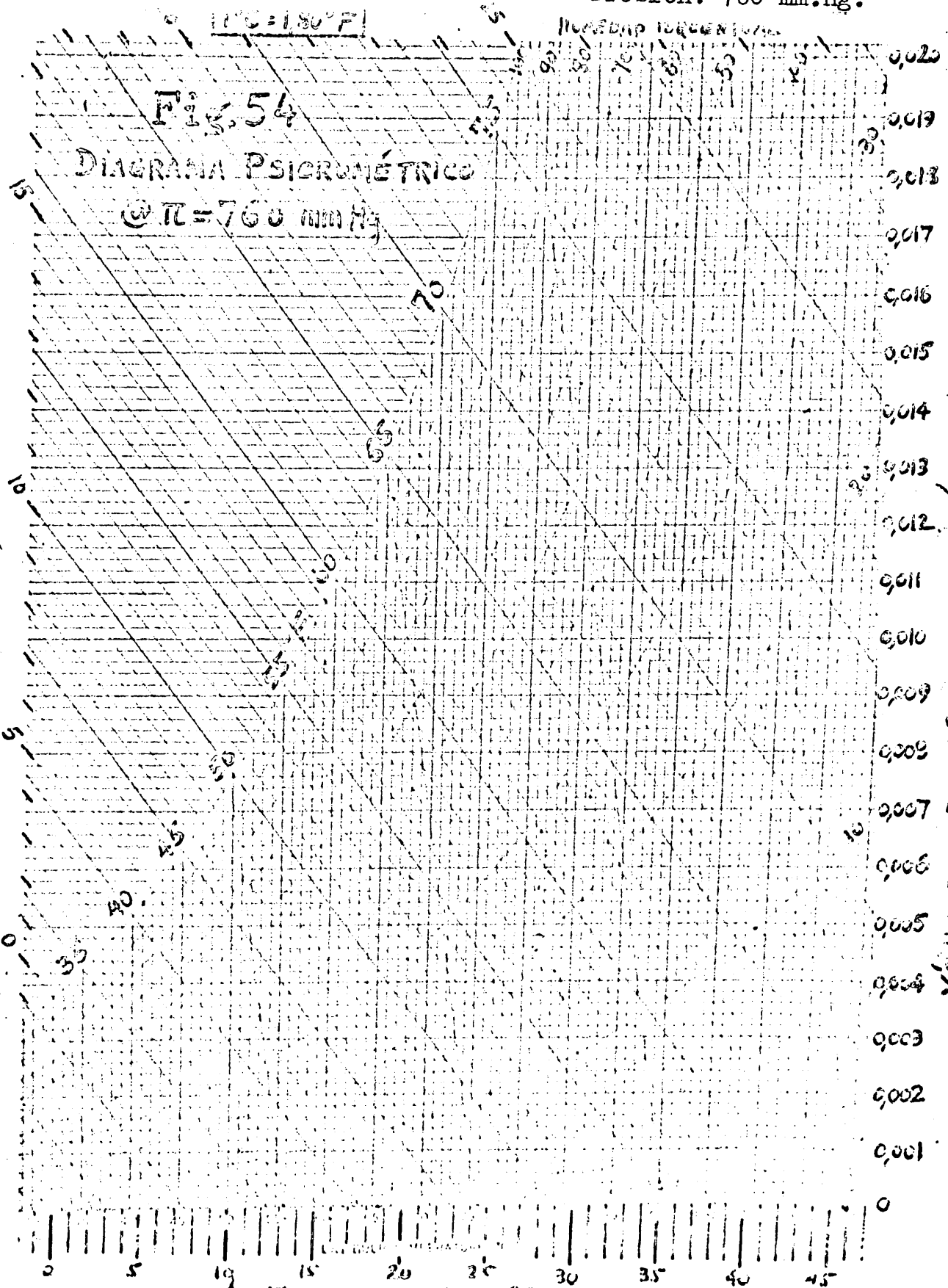
DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

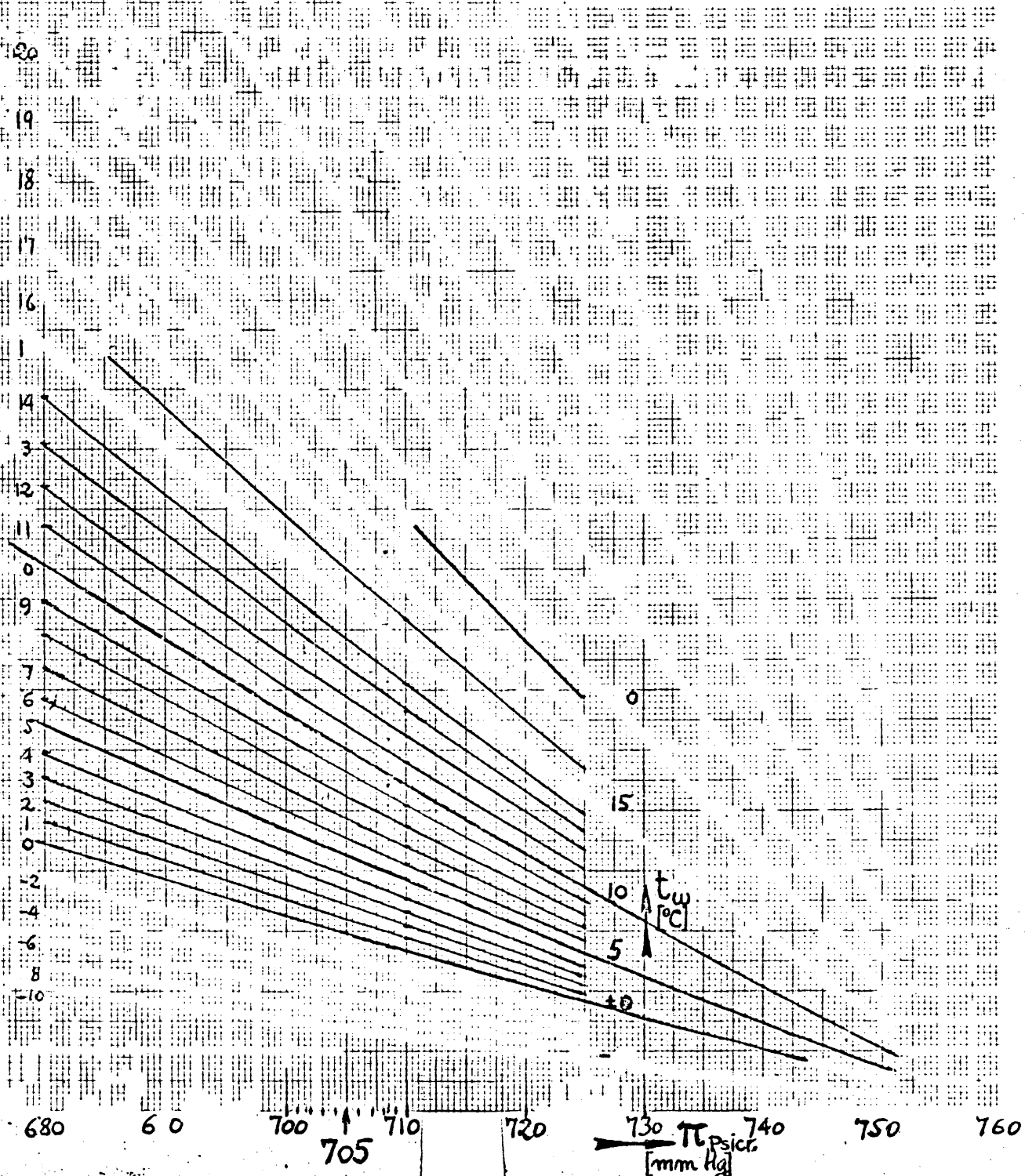
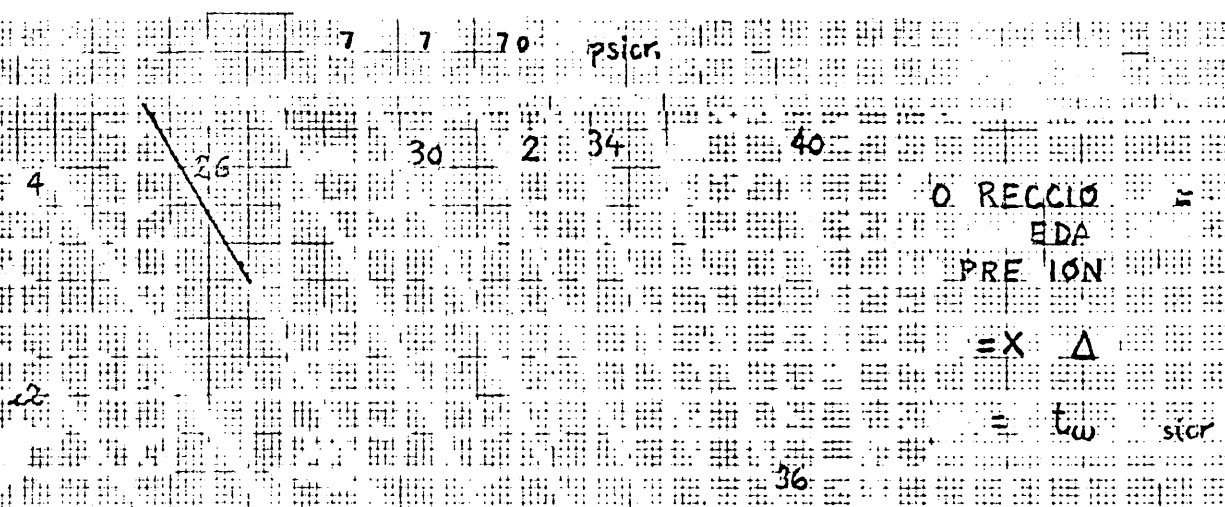
@ $P = 760 \text{ mm.Hg.}$

t_w : TEMPERATURA HÚMEDA, $^{\circ}\text{C}$

X: HUMEDAD ESPECÍFICA - Kg. agua / Kg. aire seco.

t_d : TEMPERATURA SECA, $^{\circ}\text{C}$





temperaturas húmedas de -10, -8,, 0, 1, 2,, 19, 20, 22, 24, y 40°C.

El cálculo sistemático se hizo partiendo de la base de que cuando la velocidad de paso del aire por el termómetro húmedo es de 5 m/seg. ($\pm 0,5$) coinciden las temperaturas de saturación adiabática y húmeda, verificándose entonces que

$$\frac{x_s - x}{t_s - t} = - \frac{s}{r_s} = \frac{x_w - x}{t_w - t}, \quad (66)$$

que desarrollada conduce a

$$x = \frac{\frac{0,622 \cdot p_s}{\pi - p_s} \cdot r_s - 0,24(t - t_w)}{r_s + 0,46(t - t_w)} \quad (67)$$

Teniendo en cuenta que $p_s = f(t_s) = f(t_w)$, que $r_s = \varphi(t_s) = \varphi(t_w)$, tabulando los resultados para un determinado valor de $t - t_w$ en todas las series (ya que la temperatura seca se comprobó matemáticamente que no influía en manera alguna apreciable, tomando casos extremos como término de

comparación) se dedujeron los puntos de la gráfica de la figura 55 para cada valor de la presión atmosférica y de la temperatura húmeda indicados, como diferencias con los correspondientes a la misma temperatura húmeda y presión atmosférica de 760 mm.Hg.

Se realizó también un estudio comparativo de determinación de la humedad absoluta mediante:

a) los psicrómetros contruídos, con velocidad de paso del aire de 5 m/seg.,

b) los aspiropsicrómetros utilizados normalmente en meteorología en los que la velocidad de paso del aire por el termómetro húmedo es de 2,5 m/seg. aproximadamente, y,

c) los psicrómetros Avgust corrientes sin circulación forzada de aire.

Se comprobó la existencia de pequeñas diferencias sistemáticas entre utilizar las tablas aspiropsicrométricas con su corrección de presión, las tablas psicrométricas normales y las de saturación adiabática y corrección de presión antes descritas. Para los mismos datos de temperaturas seca y húmeda y presión de trabajo, un ejemplo comparativo ilustra las diferencias existentes:

Datos sobre base:

$$t = 16,1 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_w = 12,7 \text{ }^{\circ}\text{C}; \pi = 715 \text{ mm. Hg.}$$

Humedad relativa utilizando tablas psicrométricas normales: 62,9 % (aire pasa por convección natural). Avgust.

Humedad relativa utilizando tablas aspiropsicrométricas: 62,4 % (aire pasa a 2,5 m/seg. aproximadamente). Assmann.

Humedad relativa utilizando las tablas de saturación adiabática: 62,3 % (aire pasa a 5,0 m/seg.). Diseño propio.

IX-1.5.4. Prueba de comprobación de los psicrómetros: Con los dos psicrómetros conectados en posición de trabajo, aire circulando normalmente por la torre, pero estando la torre y el relleno de madera completamente secos, aunque las lecturas de los dos psicrómetros no coincidían, la humedad absoluta del aire a la entrada difería con la de salida en 0,00002 Kg.vapor/Kg. aire seco, que es el límite de exactitud alcanzable mediante las gráficas psicrométricas utilizadas, lo que supone un error relativo menor del 0,4 %.

Advertencia tenida en cuenta durante las determinaciones de humedad con los psicrómetros es que la causa comprobada de error más importante era el mal estado del pabalo húmedo: podía estar excesivamente mojado debido a arrastre de

TABLA XXXV

Prueba de comprobación de los psicrómetros.

	Temperatu- ras leídas °C.	Temperatu- ras corre- gidas. °C.	Humedad absoluta (Kg.vapor/ Kg.aire seco)
Psicrómetro 1 ..	$\left\{ \begin{array}{l} t_1 : 19,40 \\ t_{w_1} : 10,60 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 19,00 \\ 10,70 \end{array} \right.$.. 0,00555
Psicrómetro 2 ..	$\left\{ \begin{array}{l} t_2 : 19,75 \\ t_{w_2} : 11,00 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 19,30 \\ 10,80 \end{array} \right.$.. 0,00557

gotas por el aire a su paso cerca del nivel de agua manteni-
do dentro del psicrómetro como fuente de humedad al pabilo
del termómetro húmedo; también podía secarse parcialmente
al estar ese nivel demasiado bajo; las lecturas, en ambos
casos, resultaban siempre erróneas. Como medida de precaución
se comprobaba sistemáticamente después de cada serie de lec-
turas de un experimento el estado de los pabilos de los ter-
mómetros húmedos, repitiéndose las lecturas después de po-
nerlos en condiciones si se notaba alguna anormalidad.

IX-2.

DETALLES DEL PROCEDIMIENTO.

IX-2.1.

Desarrollo del programa elaborado para el cálculo de los coeficientes individuales de transporte mediante el Sistema IBM-1620.

Según se indicó en la Introducción, para el cálculo de los coeficientes volumétricos individuales de transferencia de materia y transmisión de calor por el método de Mickley, es necesario realizar primero un tanteo gráfico previo por aproximaciones sucesivas hasta encontrar el valor de la pendiente de las rectas de unión

$$\text{PEND} = - \frac{h_{La}}{k'a} \quad (39)$$

que relaciona el coeficiente de transmisión de calor en la fase líquida, h_{La} , con el de transferencia de materia en la fase gaseosa, $k'a$, y obtener después el valor de la integral entálpica

$$\text{INT} = \int_{i_{Gi}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} = N_G \quad (36)$$

para calcular el del coeficiente $k'a$.

El valor del tercer coeficiente h_{Ga} se obtiene directamente por la relación de Lewis, que liga este coeficiente con $k'a$ y el calor húmedo del aire, s_m :

$$h_{Ga}/k'a \simeq s_m \quad (21)$$

Una de las orientaciones que se decidió dar a este trabajo de investigación fué la de estudiar las posibilidades existentes en el empleo de ordenadores electrónicos para la resolución de problemas prácticos que comprenden tanteos gráficos múltiples muy sujetos a errores sistemáticos, comparándolos con los datos obtenidos "manualmente". Para ello se contó con los servicios del Instituto de Electricidad y Automática, I.E.A., perteneciente al Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica del C.S.I.C., que opera en la Facultad de Ciencias, sección de Físicas de la Universidad de Madrid. El I.E.A. está próximo al laboratorio de Ingeniería Química donde se desarrolló este trabajo, y cuenta con un ordenador electrónico digital, sistema IBM-1620 y personal técnico investigador que trabaja con este ordenador. Este equipo de I.E.A. estudió y preparó los programas necesarios para la resolución del tanteo gráfico de la construcción de Mickley y cálculo de la integral en-

1º) Desde el punto A, (T_1, i_{G_1}) se traza una recta AC con pendiente a tantear $PEND = -h_{La}/k'a$, hasta que corte a la curva de equilibrio PQ en el punto C($t_{i_1}, i_{G_{i_1}}$).

2º) Desde el punto C se traza otra recta hasta el punto M(t_1, i_{G_1}).

3º) Dividiendo el segmento AB en n partes se traza la recta DF paralela a la recta AM, a un valor de

$$i'_G = i_{G_1} + \frac{i_{G_2} - i_{G_1}}{n} .$$

4º) A partir del punto D y con la misma pendiente PEND tanteada en el paso 1º), se repiten los pasos 1º), 2º) y 3º), obteniéndose los puntos E, F y G.

5º) Estos pasos se repiten consecutivamente n veces hasta que el punto N de la envolvente en la línea MF ... N coincida con el punto $(t_2 ; i_{G_2})$ dentro del intervalo $(t_2 - 0,05; i_{G_2})$, $(t_2 + 0,05; i_{G_2})$, lo que ocurrirá si la pendiente tanteada PEND era la correcta.

6º) Si el punto N no cae en el mencionado intervalo se tantea otra nueva pendiente y se repite la construcción gráfica hasta encontrar el valor de PEND que haga coincidir el valor de N dentro del intervalo descrito.

7º) Una vez hallado el valor correcto de PEND, se calcula el valor de la integral entálpica INT,

$$\int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} \quad \text{por el método de}$$

los trapecios mediante los sucesivos valores de $(i_{Gi} - i_G)$ encontrados en el tanteo gráfico.

La pendiente inicialmente ensayada estaba comprendida entre 0,1 y 51,2 (los valores normales oscilan entre 0,5 y 3,0) y el primer valor ensayado era 25,6. Como el valor de la pendiente tanteada es función biunívoca y monótona del valor del punto N final del tanteo, el programa, tras comprobar que PEND es excesiva, vuelve a tantear otro valor

de $PEND = 25,6 - \frac{25,6}{2}$, y si comprueba que es baja, tantea

el valor $PEND = 25,6 + \frac{25,6}{2}$.

A lo largo del tanteo gráfico, si la línea envolvente MN ... se acerca excesivamente a la curva de equilibrio PQ, el tanteo se interrumpe y recomienza a un valor de la pendiente superior en 0,2 puntos al que provocó ese excesivo acercamiento.

Si este acercamiento no se produce, el valor de las pendientes a tantear se realiza en la forma indicada inicialmente.

El número de intervalos, n , necesario para realizar el tanteo gráfico se dejó como un parámetro del programa para poder elegirlo a posteriori en cada caso sin requerir excesivo tiempo de operación al ordenador y obtener resultados suficientemente exactos. En general se eligió $n = 30$.

En cuanto el punto N de un tanteo caía dentro del intervalo $(t_2 - 0,05; i_{G2})$, $(t_2 + 0,05; i_{G2})$, el programa memorizaba el dato de $PEND$, realizaba un nuevo tanteo gráfico con el siguiente valor de $PEND$, hacía una interpolación para calcular los valores de $PEND$ que caían exactamente en los dos extremos del intervalo y, con ambos valores, denominados $PEND$ INFERIOR y $PEND$ SUPERIOR, efectuaba de nuevo la construcción de Mickley, reteniendo los valores de los sucesivos puntos $A,M; D,F; G \dots B,N$ de la construcción correspondientes a $PEND$ INF y $PEND$ SUP.

Con dichas dos series de valores el ordenador calculaba los correspondientes valores de $INTEGRAL$ INFERIOR e $INTEGRAL$ SUPERIOR respectivamente.

De esta forma el programa calculaba el error de los resultados debido al error de uno de los datos experimentales, permitiendo hacer una crítica del método de Mickley en lo referente a la máxima exactitud que se puede esperar en el cálculo de los coeficientes volumétricos individuales de transporte por este método.

Como dato base para la preparación del programa se supusieron exactos (sin error absoluto) los datos de temperaturas del agua y entalpía y temperatura del aire a la entrada de la torre. La temperatura del aire a la salida de la torre que es el valor "objetivo" del tanteo gráfico, se admitió que era exacta dentro del intervalo $t_2 \pm 0,05$ °C.

IX-2.1.1.

Ecuación de la curva de equilibrio.

La función $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$ se dedujo a partir de la expresión general

$$i_G = C_{AS} \cdot t + x (r_0 + C_V \cdot t) \quad (68)$$

donde

i_G = entalpía del aire húmedo, en Kcal/Kg.

C_{AS} = calor específico del aire seco, en Kcal/Kg.°C.

- t = temperatura del aire, en $^{\circ}\text{C}$.
 x = humedad del aire, en $\text{Kg.vapor/Kg.aire seco}$.
 r_o = calor latente de vaporización del agua, en Kcal/Kg .
 C_v = calor específico del valor de agua, en $\text{Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C}$.

Como entalpía de referencia o base cero de esta función de estado se tomaron las siguientes condiciones: para el agua, el estado líquido, a 0°C y 1 atmósfera, despreciando el efecto de la presión cuando comparamos estas condiciones con las del estado de referencia normal para el agua líquida en el punto triple (0°C y $62,3 \text{ Kg/m}^2$.) que es del orden de $0,2 \text{ Kcal/Kg}$. agua. Para el aire seco se tomó 0°C y 1 atmósfera.

Realizado un estudio bibliográfico sobre los valores de los parámetros C_{AS} , C_v y r_o en las condiciones de referencia, 0°C y 1 atm., se tomaron los siguientes:

$$C_{AS} = 0,241 \pm 0,0003 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C} \quad (1) (2) (3)$$

$$C_v = 0,446 \pm 0,001 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C} \quad (1) (2) (3)$$

$$r_o = 597,2 \pm 0,2 \text{ Kcal/Kg.} \quad (4) (5)$$

En el intervalo normal de temperaturas de trabajo de 0 á 50°C el calor latente de vaporización del agua, r , es función lineal de la temperatura. Esta función se dedujo de los valores de r a diferentes temperaturas en este intervalo (4).

$t. \text{ } ^\circ\text{C}$	$T. \text{ } ^\circ\text{K}$	$r, \text{ Kcal/Kg.}$
0	273,16	597,3
10	283,16	591,7
20	293,16	586,0
30	303,16	580,4
40	313,16	574,7
50	323,16	569,0

que puede representarse por la función lineal

$$r = 751,93 - 0,5660 \cdot T \quad (69)$$

La humedad absoluta del aire x , se expresa a partir de la presión parcial del vapor de agua en el aire p , y de la presión total del aire π , según la expresión

$$x = \frac{P \text{ Mol . agua}}{P \text{ Mol . aire}} \cdot \frac{p}{\pi - p} = 0,6220 \frac{p}{\pi - p} \quad (70)$$

Una expresión numérica exacta que relaciona la humedad x , con la presión atmosférica π y la temperatura del aire, t , se obtiene mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\frac{dp}{p} = \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{T^2} dT \quad (71)$$

donde

$$T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,16$$

$$y \quad R = 1,987 \text{ Kcal/Kmol.}^\circ\text{K} = 0,11029 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{K}$$

(Constante universal de los gases perfectos:
para el agua con P.Mol; 18,016 Kg/Kmol.).

Integrada la ecuación de Clausius-Clapeyron entre los límites p_0 y p , se obtiene, tomando como punto fijo el valor de la presión de vapor de agua pura a 20°C ($293,16 \text{ } ^\circ\text{K}$), $p_0 = 17,535 \text{ mm.Hg}$, la expresión siguiente:

$$\ln p = 55,2734 - \frac{6817,8}{T} - 5,1319 \cdot \ln T \quad (72)$$

es decir, en forma exponencial

$$p = \frac{e^{55,2734 - \frac{6817,8}{t + 273,16}}}{(t + 273,16)^{5,1319}} \quad (73)$$

Esta expresión se comprobó frente a valores experimentales exactos de la bibliografía, encontrándose una des-

viación de $\pm 0,2 \%$ á $t = 0^{\circ}\text{C}$ y de $- 0,4 \%$ á $t = 50^{\circ}\text{C}$ como errores extremos del intervalo práctico de temperaturas.

La expresión final resultante para la función $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$ fué la siguiente:

$$i_{G_i} = 0,241 \cdot t_i + (371,5 + 0,2771 \cdot t_i) \quad .$$

$$\begin{aligned} & \frac{e^{55,2734 - \frac{6817,8}{t_i + 273,16}}}{(t_i + 273,16)^{5,1319}} \\ & \cdot \frac{\pi - \frac{e^{55,2734 - \frac{6817,8}{t_i + 273,16}}}{(t_i + 273,16)^{5,1319}}}{\pi} \end{aligned} \quad (74)$$

$$[i_{G_i}] = \text{Kcal/Kg.}$$

$$[t_i] = ^{\circ}\text{C}$$

$$[\pi] = \text{mm. Hg.}$$

IX-2.1.2.

Lenguaje y partes del programa.

El programa se realizó en lenguaje FORTRAN que es más fácil de utilizar que el lenguaje "Máquina", pero ocupa muchos más espacios de memoria lo que obligó a dividir el programa en tres partes, obteniéndose con la primera las funciones $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$ para cada intervalo de presiones de trabajo, realizándose con la segunda el tanteo gráfico de Mickley por aproximaciones sucesivas hasta encontrar el valor correcto de la pendiente de las rectas de unión con el margen de error correspondiente y calculándose con la tercera el valor de la integral y su error. Las tres partes del programa, en lenguaje FORTRAN, se contienen, listadas, en las Tablas XXXVI, XXXVII y XXXVIII.

IX-2.1.3.

Lo que hacen los programas.

Primera parte ó Programa: Admite como dato la presión atmosférica π , y calcula 100 puntos de la curva $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$. Saca los puntos por cinta: cintas de salida S - 1 - π .

Segunda parte ó Programa: Acepta la cinta de salida S - 1 - π y a continuación admite por máquina de escribir el número n de partes en que debe dividirse el interva-

TABLA XXXVI

Programa 1 - Cálculo de la función $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$

```
DIMENSION F(101)
10 ACCEPT 201,P
   TA=0.
   TB=371.5
   TC=273.16
   DO 301 I=1,101
   ET=EXP(55.2734-6817.8/TC)/TC**5.1319
   F(I)=TB*ET/(P-ET)+TA
   TA=TA+.1205
   TB=TB+.13855
301 TC=TC+.5
   F(I)=0.
   DO 46 I=1,101
   PUNCH TAPE 100,F(I)
46  CONTINUE
   PUNCH TAPE 202,P
   PAUSE
   GO TO 10
100 FORMAT(E14.8)
201 FORMAT(F5.1)
202 FORMAT(F6.1)
END
```

TABLA XXXVII

Programa 2 - Tanteo gráfico y construcción de
Mickley.

```
DIMENSION DTT(6)
DIMENSION AYY(35),AY(35),ATT(35),AT(35),F(101)
45 DTT(1)=32.
   DTT(2)=16.
   DTT(3)=8.
   DTT(4)=4.
   DTT(5)=2.
   DTT(6)=1.
   DO 301 I=1,101
301 ACCEPT TAPE 377,F(I)
   ACCEPT TAPE 987,P
   ACCEPT 101,NN
   DDP=0.2
97 ACCEPT TAPE 100,TT1,YY1,TT2,YY2,T3,Y3,T4,Y4
   IF (SENSE SWITCH 3) 44,45
44 AN=NN
   DY=(Y3-YY2)/AN
   DT=(T3-TT2)/AN
   PEND=25.6
   DPEND=25.6
   MM=1
   L=1
50 Y1=YY1
   T1=TT1
   Y2=YY2
   T2=TT2
   K=0
22 I=64
   AI=I
   DO 904 NM=1,6
   Y=PEND*(2.*T2+1.-AI)/2.+Y2
   IF(Y-F(I)) 900,900,902
900 AI=AI-DTT(NM)
   GO TO 903
902 AI=AI+DTT(NM)
903 I=AI
904 CONTINUE
   Y=PEND*(2.*T2+1.-AI)/2.+Y2
   IF(Y-F(I)) 905,905,906
905 F2=F(I)
   F1=F(I-1)
   TF2=1
   TF2=(TF2-1.)/2.
   TF1=TF2-0.5
   GO TO 907
```

... / ...

TABLA XXXVII - (Continuación)

... / ...

```

906 F1=F(I)
    F2=F(I+1)
    TF1=1
    TF1=(TF1-1.)/2.
    TF2=TF1+0.5
907 Z1=PEND*T2+Y2
    PENDP=(F2-F1)/(TF2-TF1)
    Z2=PENDP*TF1-F1
    T=(Z1+Z2)/(PEND+PENDP)
    Y=Z1-PEND*T
    K=K+1
    AYY(K)=Y
    AY(K)=Y1
    ATT(K)=T
    AT(K)=T1
    Y2=Y2+DY
    T2=T2+DT
    S=(T-T1)/(Y-Y1)
    T1=T1+S*(Y2-Y1)
    Y1=Y2
    GO TO (700,71,71),L
700 AAI=2.*T1+1.
    I=AAI
    AAI=1
    AAI=(AAI-1.)/2.
    FF=F(I)+(F(I+1)-F(I))*(T1-AAI)/0.5
    FF=FF*0.98
    IF(FF-Y1) 70,70,71
70 IF(SENSE SWITCH 1) 300,317
300 PRINT 104,PEND,K,DPEND
317 IF(SENSE SWITCH 2) 78,79
78 ACCEPT 202,DDP,PEND,DPEND
    PAUSE
79 PEND=PEND+DDP
    GO TO 50
71 IF(K-NN) 22,23,23
23 GO TO (723,704,704),L
723 FF=T4-T1
    IF(FF) 90,37,37
90 FP=-FF
    GO TO 87
37 FP=FF
87 IF(FP-.05) 33,34,34
34 DPEND=DPEND/2.
    IF(FF) 40,40,42

```

... / ...

TABLA XXXVII - (Continuación)

... / ...

```
40 PEND=PEND-DPEND
   GO TO 50
42 PEND=PEND+DPEND
   GO TO 50
33 GO TO (35,36),MM
35 MM=2
   PE1=PEND
   TE1=T1
   GO TO 34
36 PE2=PEND
   TE2=T1
   CPT=(PE2-PE1)/(TE2-TE1)
   PEA=PE1+CPT*(T4-0.05-TE1)
   PEB=PEA+0.1*CPT
   PUNCH TAPE 378,NN,P
   NN=NN+1
   PEND=PEA
   L=2
   GO TO 50
704 DO 59 K=1,NN
59 PUNCH TAPE 377,AT(K),AY(K),ATT(K),Ayy(K)
   GO TO (71,706,705),L
706 PEND=PEB
   L=3
   GO TO 50
705 PUNCH TAPE 377,YY1,TT1,YY2,TT2,Y3,T3,Y4,T4,PEA,PEB
   NN=NN-1
   GO TO 97
202 FORMAT(F3.0/F5.0/F5.0)
100 FORMAT(F5.0)
101 FORMAT(I2)
104 FORMAT(/5HERROR,3X F6.2,3X I3,3X F6.2)
377 FORMAT(E14.8)
378 FORMAT(I37F6.1)
987 FORMAT(F6.1)
109 FORMAT(E14.8)
   END
```

TABLA XXXVIII

Programa 3 - Cálculo de la integral y datos finales.

```
DIMENSION AT(35),AY(35),ATT(35),AYY(35)
97 ACCEPT TAPE 378,NN,P
  L=1
  NNP=NN+1
11 DO 59 K=1,NNP
59 ACCEPT TAPE 377,AT(K),AY(K),ATT(K),AYY(K)
  IF(SENSE SWITCH 1) 57,58
58 PRINT 999
  DO 69 K=1,NNP
  PRINT 107,AT(K),AY(K),ATT(K),AYY(K)
69 CONTINUE
57 DO 60 K=1,NNP
  AYY(K)=1./(AYY(K)-AY(K))
60 CONTINUE
  YNT=0.
  DO 61 K=2,NN
  YNT=YNT+AYY(K)
61 CONTINUE
  YNT=YNT+(AYY(1)+AYY(NNP))/2.
  YNT=YNT*(AY(2)-AY(1))
  GO TO (700,701),L
700 YNT1=YNT
  AT1=AT(NNP)
  L=2
  GO TO 11
701 YNT2=YNT
  AT2=AT(NNP)
  ACCEPT TAPE 377,YY1,TT1,YY2,TT2,Y3,T3,Y4,T4,PEA,PEB
  PRINT 110
  PRINT 109,P,YY1,TT1
  PRINT 509,YY2,TT2
  PRINT 108,Y3,T3,Y4,T4
  PRINT 105,PEA,PEB
  PRINT 106,AT1,AT2
  PRINT 705,YNT1,YNT2
  IF(SENSE SWITCH 2) 48,97
48 PAUSE
  GO TO 97
201 FORMAT(F5.1)
105 FORMAT(17HPEND. INFERIOR = ,F7.3/17HPEND. SUPERIOR = ,F7.3)
705 FORMAT(16HINTEGRAL INF. = ,E12.6/16HINTEGRAL SUP. = ,E12.6)
107 FORMAT(E14.6,3X)
109 FORMAT(10HPRESION = ,F6.1/8HPUNTO 1 ,F6.2,3X F6.2)
509 FORMAT(8HPUNTO 2 ,F6.2,3X F6.2)
108 FORMAT(8HPUNTO 3 ,F6.2,3X F6.2/8HPUNTO 4 ,F6.2,3X F6.2//)
110 FORMAT(///)
999 FORMAT(/)
377 FORMAT(E14.8)
378 FORMAT(I3/F6.1)
106 FORMAT(/13HT INFERIOR = ,F8.4/13HT SUPERIOR = ,F8.4//)
END
```

lo de T_1 á T_2 . Lee después por cinta de entrada E - 2 - j, previamente preparada, los datos experimentales del diagrama entalpía/temperatura en forma de cuatro puntos, 1, 2, 3 y 4, del primer caso a resolver, determina por tanteo y extrapolación las pendientes que van a parar a los extremos del intervalo $(t_2 - 0,05 ; i_{G2})$ $(t_2 + 0,05 ; i_{G2})$ y una vez hecho esto realiza el cálculo completo para cada una de las dos pendientes, sacando una cinta S - 2 - j con las $n + 1$ parejas de puntos $(t_i, i_{G_i})_m$, $(t, i_G)_m$. La selección de las pendientes a tantear se hace de la forma antes indicada según la envolvente MF...N se acerque o no a la curva de equilibrio.

Tercera parte o Programa 3: Admite como cinta de entrada la de salida S - 2 - j del programa anterior y suministra la presión de partida, los cuatro puntos base, la pendiente que va a parar al extremo izquierdo del intervalo, PEND INFERIOR y la que va al extremo derecho, PEND SUPERIOR. Además suministra las abscisas de los puntos de acierto, TEMP INFERIOR y TEMP SUPERIOR para ambas pendientes; estos puntos coinciden sensiblemente con los extremos del intervalo. Da finalmente los valores de las integrales entálpicas calculadas con las series de valores calculados con cada una de las pendientes, en forma de INT INFERIOR e INT SUPERIOR. Si se desea pueden listarse por máquina de escribir además, las ordenadas de cada una de las parejas de valores calcu-

lados en cada serie.

IX-2.1.4.

Instrucciones para operar con los programas.

Programa 1: Sacar cola de cinta. START. Teclear la presión π en mm.Hg con el formato F5.1 (XXX'X). R-S. Se perfora S-1- π .

Si se desea puede obtenerse otra cinta de salida para otra presión. Basta pulsar START (se recommienza el programa) y así sucesivamente.

Programa 2: Se alimenta de la cinta de salida S-1- π , y luego con una cinta de entrada E-2-j conteniendo los datos de los cuatro puntos en la secuencia siguiente $t_1, i_{G1}; T_1, i_{G1}; T_2, i_{G2}; t_2, i_{G2}$; en el Formato F5.0 (XX'XX), para los sucesivos casos, sin solución de continuidad. Los switches han de estar en las siguientes posiciones: SW1 en OFF; SW2 en OFF; SW3 en ON y SW4 en OFF. Pasos: Sacar cola de cinta. Colocar cinta de salida S-1- π . START. Cuando termina, colocar cinta de entrada E-2-j. Teclear por máquina el número n de partes en que queremos dividir el intervalo de T_1 á T_2 ; Formato I2 XX R-S. La calculadora lee los puntos del caso j de la cinta E-2-j, procesa el caso y luego saca los resultados en cinta de salida S-2-j.

Hecho ésto pasa automáticamente a leer el siguiente caso, perfora los resultados y así sucesivamente.

Si en un momento determinado se desea cambiar de presión de trabajo π , es decir, de cinta de salida S-1- π , o de número de partes n, se pone el SW3 en OFF. Con ello, una vez leídos los puntos del caso en puertas, no lo procesa y pasa al comienzo de este programa.

Programa 3: Se alimenta con la cinta de salida S-2-j. SW1 en ON; SW2 en OFF. Preparar el papel de la máquina de escribir. Cargar con la cinta S-2-j. START. Lee los datos intermedios correspondientes al primer caso y saca los resultados por máquina pasando al siguiente caso sin solución de continuidad. Si se quiere PAUSE entre caso y caso, poner SW2 en ON. Si se quiere que, además, escriba las parejas de ordenadas $(i_{G_1}, i_G)_m$ correspondientes a cada pendiente, poner SW1 en OFF.

IX-2.1.5.

Selección de la función $i_{G_1} = f(t_1, \pi)$ en cada caso.

Mediante el Programa núm. 1 se obtuvieron como datos útiles en forma tabulada los de la entalpía de equilibrio i_{G_1} en función de t_1 correspondientes a las presiones $\pi = 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710$ y 711 mm.Hg. que fue-

ron las más frecuentemente utilizadas. Las Tablas XXXIX á XLVI contienen cada una 100 valores de i_{G_i} correspondientes al intervalo de 0 á 50°C, de medio en medio grado.

Para conocer la exactitud con que se debía tomar la presión de trabajo π en los experimentos realizados a diferentes presiones atmosféricas, de forma que éstos pudieran agruparse en series y calcularse con una π común sin error apreciable, se realizó un estudio práctico comparando los resultados obtenidos de efectuar los cálculos con unos mismos datos experimentales, a diferentes presiones de trabajo. Para presiones comprendidas en intervalos de $\pm 0,5$ mm.Hg, el error máximo encontrado tanto en el valor de la pendiente como en el de la integral era de $\pm 0,25 \%$, que es despreciable frente al error del método (debido a la imprecisión de t_2) que era del orden del 2 á 4 %. Por tanto se agruparon los datos experimentales para el cálculo empleando las ecuaciones de la curva de equilibrio de uno en un mm.Hg: Un experimento en que la presión en el interior de la torre había sido de 705,3 mm.Hg, por ejemplo, se calculaba con la cinta S-1-705, y si $\pi = 705,6$ se tomaba la S-1-706.

TABLA XXXIX - Datos de equilibrio entalpía/
temperatura a $\pi = 704,0$ mm.Hg.

$i_{g,i}$	t_i	
+.00000000E-99	0	+.19235959E+02 25
+.26506851E+01	0.5	+.19773794E+02
+.28657437E+01	1	+.20323596E+02
+.30339579E+01	1.5	+.20885737E+02
+.33054125E+01	2	+.21460509E+02
+.35302051E+01	2.5	+.22048245E+02
+.37584331E+01	3	+.22649328E+02
+.39902004E+01	3.5	+.23264097E+02
+.42256037E+01	4	+.23892926E+02
+.44647512E+01	4.5	+.24536183E+02
+.47077517E+01	5	+.25194290E+02 30
+.49547087E+01		+.25867615E+02
+.52057437E+01		+.2656583E+02 5
+.54609659E+01		+.27261605E+02
+.57204988E+01		+.27983172E+02
+.59844614E+01		+.28721681E+02
+.62529748E+01		+.29477607E+02
+.65261818E+01		+.30251459E+02
+.68042018E+01		+.31043695E+02
+.70871702E+01		+.31854832E+02
+.73752266E+01	10	+.32685357E+02 35
+.76685137E+01		+.33535869E+02
+.79671782E+01		+.34406939E+02
+.82713595E+01		+.35299044E+02
+.85812284E+01		+.36212873E+02
+.88969272E+01		+.37148962E+02
+.92186168E+01		+.38107984E+02
+.95464633E+01		+.39090573E+02
+.98806376E+01		+.40097416E+02
+.10221314E+02		+.41129192E+02
+.10568667E+02	15	+.42186595E+02 40
+.10922880E+02		+.43270421E+02
+.11284148E+02		+.44381379E+02 41
+.11652637E+02		+.45520279E+02
+.12023574E+02		+.46687959E+02 42
+.12412141E+02		+.47885244E+02
+.12803547E+02		+.49112991E+02 43
+.13203006E+02		+.50372036E+02
+.13610739E+02		+.51663620E+02 44
+.14026972E+02		+.52988268E+02
+.14451917E+02 20		+.54347453E+02 45
+.14885814E+02		+.55741848E+02
+.15328925E+02		+.57172763E+02 46
+.15781483E+02		+.58641151E+02
+.16242724E+02		+.60148361E+02 47
+.16715932E+02		+.61695419E+02
+.17198358E+02 23		+.63283665E+02 48
+.17691292E+02		+.64914499E+02
+.18195007E+02		+.66589137E+02 49
+.18709800E+02		+.68309020E+02
		+.70075726E+02 50
		+704.0

TABLA XL - Datos de equilibrio entalpía/temperatura a
 $\pi = 705,0$ mm.Hg.

t_1 **L998 t_2	+.19216567E+02	71
+.00000000E-99	+.19753768E+02	
+.26470713E+01	+.20302917E+02	
+.28619945E+01	+.20864385E+02	
+.30800680E+01	+.21438463E+02	
+.33013773E+01	+.22025483E+02	
+.35260197E+01	+.22625829E+02	
+.37510325E+01	+.23239837E+02	
+.39856992E+01	+.23867683E+02	
+.42209266E+01	+.24510331E+02	
+.44599131E+01	+.25167605E+02	72
+.47027366E+01	+.25840071E+02	
+.49495109E+01	+.26528154E+02	
+.52003571E+01	+.27232263E+02	
+.54553843E+01	+.27952889E+02	
+.57147158E+01	+.28690427E+02	
+.59784704E+01	+.29445352E+02	
+.62467692E+01	+.30218171E+02	
+.65197545E+01	+.31009343E+02	
+.67975456E+01	+.31819382E+02	
+.70802779E+01	+.32648775E+02	
+.73680905E+01	+.33498118E+02	
+.76611256E+01	+.34367983E+02	
+.79595306E+01	+.35258845E+02	
+.82634439E+01	+.36171392E+02	
+.85730363E+01	+.37106156E+02	
+.88884497E+01	+.38063813E+02	
+.92098449E+01	+.39044992E+02	
+.95373877E+01	+.40050381E+02	
+.98712486E+01	+.41080656E+02	
+.10211602E+02	+.42136508E+02	
+.10558621E+02	+.43218734E+02	
+.10912490E+02	+.44326040E+02	
+.11273404E+02	+.45465232E+02	
+.11641527E+02	+.46631150E+02	
+.12017087E+02	+.47826615E+02	
+.12400265E+02	+.49052480E+02	
+.12791270E+02	+.50309631E+02	
+.13190315E+02	+.51599156E+02	
+.13597622E+02	+.52921829E+02	
+.14013414E+02	+.54278767E+02	
+.14437906E+02	+.55670943E+02	
+.14871335E+02	+.57099564E+02	
+.15313965E+02	+.58565579E+02	
+.15766026E+02	+.60070323E+02	
+.16227755E+02	+.61614850E+02	
+.16699435E+02	+.63200466E+02	
+.17181316E+02	+.64828579E+02	
+.17673689E+02	+.66500399E+02	
+.18176826E+02	+.68217384E+02	
+.18691029E+02	+.69981047E+02	
	+705.0	

TABLA XLI - Datos de equilibrio entalpía/temperatura a
 $\pi = 706,0 \text{ mm.Hg.}$

$t, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ cal/g}$	$t, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ cal/g}$
0	+0.00000000E-99	90	+0.22002788E+02
0,5	+0.26434688E+01	95	+0.22602399E+02
1,0	+0.28582559E+01	100	+0.23215649E+02
	+0.30761893E+01		+0.23842913E+02
	+0.32973536E+01		+0.24484556E+02
	+0.35218462E+01		+0.25141000E+02
	+0.37497643E+01		+0.25812609E+02
	+0.39812111E+01		+0.26499809E+02
	+0.42162834E+01		+0.27203008E+02
	+0.44550889E+01		+0.27922695E+02
	+0.46977359E+01		+0.28659266E+02
	+0.49443280E+01		+0.29413193E+02
	+0.51949359E+01		+0.30184983E+02
	+0.54498186E+01		+0.30975094E+02
	+0.57089494E+01		+0.31784038E+02
	+0.59724967E+01		+0.32612302E+02
	+0.62405814E+01		+0.33460481E+02
	+0.65133457E+01		+0.34329145E+02
	+0.67909086E+01		+0.35218768E+02
	+0.70734053E+01		+0.36130036E+02
10,0	+0.73609748E+01		+0.37063481E+02
	+0.76537592E+01		+0.38019777E+02
	+0.79519050E+01		+0.38999551E+02
	+0.82555511E+01		+0.40003490E+02
	+0.85643677E+01		+0.41032268E+02
	+0.88799966E+01		+0.42086576E+02
	+0.92010932E+01		+0.43167206E+02
	+0.95283331E+01		+0.44274865E+02
	+0.98618866E+01		+0.45410356E+02
	+1.0201918E+02		+0.46574517E+02
	+1.05488604E+02		+0.47768167E+02
	+1.0902131E+02		+0.48992153E+02
	+1.1262690E+02		+0.50247372E+02
	+1.1630449E+02		+0.51534895E+02
	+1.2005633E+02		+0.52855498E+02
	+1.2388423E+02		+0.54210298E+02
	+1.2779028E+02		+0.55600263E+02
	+1.3177661E+02		+0.57026593E+02
	+1.3584542E+02		+0.58490246E+02
	+1.3999896E+02		+0.59992553E+02
	+1.4423936E+02		+0.61534539E+02
	+1.4856899E+02		+0.63117525E+02
	+1.5299048E+02		+0.64742935E+02
	+1.5750614E+02		+0.66411948E+02
	+1.6211332E+02		+0.68126005E+02
	+1.6682986E+02		+0.69886676E+02
	+1.7164325E+02		+706.0
	+1.7656138E+02		**
	+1.8158693E+02		
	+1.8672300E+02		
	+1.9197231E+02		
	+1.9733801E+02		
	+2.0282298E+02		
	+2.0843096E+02		
	+2.1416482E+02		

TABLA XLII - Datos de equilibrio entalpía/temperatura
a $\pi = 707,0$ mm.Hg.

t_c	$L_{99.8}$	$h_{99.8}$
0	+.00000000E-99	+.21394565E+02
05	+.26398761E+01	+.21980160E+02
10	+.28545279E+01	+.22579088E+02
	+.30723215E+01	+.23191532E+02
	+.32933414E+01	+.23818018E+02
	+.35176847E+01	+.24458857E+02
	+.37454484E+01	+.25114473E+02
	+.39767357E+01	+.25785229E+02
	+.42116432E+01	+.26471549E+02
	+.44502784E+01	+.27173341E+02
5	+.46927495E+01	+.27892592E+02
	+.49391598E+01	+.28628198E+02
	+.51896300E+01	+.29381130E+02
	+.54442689E+01	+.30151895E+02
	+.57031995E+01	+.30940947E+02
	+.59665400E+01	+.31748801E+02
	+.62344112E+01	+.32575938E+02
	+.65069552E+01	+.33422958E+02
	+.67842906E+01	+.34290824E+02
	+.70665525E+01	+.35178812E+02
10	+.73538795E+01	+.36083205E+02
	+.76464137E+01	+.37020986E+02
	+.79443013E+01	+.37975874E+02
	+.82476810E+01	+.38954249E+02
	+.85567226E+01	+.39956742E+02
	+.88715678E+01	+.40984020E+02
	+.91923767E+01	+.42036796E+02
	+.95193146E+01	+.43115037E+02
	+.98525516E+01	+.44221854E+02
	+.10192262E+02	+.45355650E+02
15	+.10538617E+02	+.46518000E+02
	+.10891801E+02	+.47709901E+02
	+.11252008E+02	+.48932024E+02
	+.11619403E+02	+.50185307E+02
	+.11994212E+02	+.51470835E+02
	+.12376615E+02	+.52789376E+02
	+.12766821E+02	+.54142044E+02
	+.13165043E+02	+.55529805E+02
	+.13571500E+02	+.56953060E+02
	+.13986418E+02	+.58415153E+02
20	+.14410007E+02	+.59915042E+02
	+.14842505E+02	+.61454484E+02
	+.15284175E+02	+.63034670E+02
	+.15735247E+02	+.64657588E+02
	+.16195956E+02	+.66323782E+02
	+.16666585E+02	+.68034952E+02
	+.17147332E+02	+.69792612E+02
	+.17638638E+02	+.707.0
	+.18140623E+02	
	+.18653632E+02	
25	+.19177953E+02	
	+.19713892E+02	
	+.20261741E+02	
	+.20821869E+02	

TABLA XLIII - Datos de equilibrio entalpía/temperatura
a $\pi = 708,0$ mm.Hg.

t_i	**L9XS	$i_{g,i}$	+.21372712E+02
	+.00000000E-99		+.21957599E+02
0,5	+.26362935E+01		+.22555746E+02
1,0	+.28508106E+01		+.23167487E+02
	+.30684648E+01		+.23793195E+02
	+.32893406E+01		+.24433234E+02
	+.35135350E+01		+.25088025E+02
	+.37411448E+01		+.25757930E+02
	+.39722731E+01		+.26443372E+02
	+.42070162E+01		+.27144760E+02
	+.44454816E+01		+.27862578E+02
	+.46877773E+01		+.28597223E+02
	+.49340064E+01		+.29349163E+02
	+.51842894E+01		+.30118905E+02
	+.54387350E+01		+.30906903E+02
	+.56974660E+01		+.31713669E+02
	+.59606004E+01		+.32539686E+02
	+.62282537E+01		+.33385547E+02
	+.65005829E+01		+.34251820E+02
	+.67776915E+01		+.35138977E+02
	+.70597192E+01		+.36047699E+02
10,0	+.73468045E+01		+.36978520E+02
	+.76390893E+01		+.37932105E+02
	+.79367194E+01		+.38909084E+02
	+.82398334E+01		+.39910137E+02
	+.85486008E+01		+.40925936E+02
	+.88631631E+01		+.41987169E+02
	+.91836802E+01		+.43064625E+02
	+.95103170E+01		+.44169006E+02
	+.98432434E+01		+.45301112E+02
	+.10182633E+02		+.46461777E+02
	+.10528658E+02		+.47651816E+02
	+.10881501E+02		+.48872077E+02
	+.11241357E+02		+.50123436E+02
	+.11608389E+02		+.51406975E+02
	+.11982824E+02		+.52723462E+02
	+.12364842E+02		+.54074005E+02
	+.12754650E+02		+.55459570E+02
	+.13152462E+02		+.56881354E+02
	+.13558496E+02		+.58340298E+02
	+.13972978E+02		+.59837737E+02
	+.14396117E+02		+.61374685E+02
	+.14828152E+02		+.62952470E+02
	+.15269345E+02		+.64572474E+02
	+.15719924E+02		+.66235501E+02
	+.16180126E+02		+.67944174E+02
	+.16650231E+02		+.69698854E+02
	+.17130489E+02		+708.0
	+.17621139E+02		
	+.18122601E+02		
	+.18635019E+02		
	+.19158730E+02		
	+.19694042E+02		
	+.20241243E+02		
	+.20800704E+02		

TABLA XLIV - Datos de equilibrio entalpía/temperatura
a $\pi = 709,0$ mm.Hg.

t^*_{L995}	i_{G_i}
+.00000000E-99	+.20779601E+02
+.26327212E+01	+.21350924E+02
+.28471038E+01	+.21935104E+02
+.30646191E+01	+.22532522E+02
+.32853512E+01	+.23143512E+02
+.35093971E+01	+.23768446E+02
+.37368534E+01	+.24407687E+02
+.39678231E+01	+.25061655E+02
+.42024024E+01	+.25730711E+02
+.44406984E+01	+.26415279E+02
+.46828192E+01	+.27115765E+02
+.49288676E+01	+.27832654E+02
+.51789641E+01	+.28566340E+02
+.54332169E+01	+.29317292E+02
+.56917488E+01	+.30086014E+02
+.59546776E+01	+.30872961E+02
+.62221238E+01	+.31678642E+02
+.64942289E+01	+.32503541E+02
+.67711112E+01	+.33348249E+02
+.70529054E+01	+.34213332E+02
+.73397497E+01	+.35099261E+02
+.76317857E+01	+.36006718E+02
+.79291592E+01	+.36936231E+02
+.82320082E+01	+.37888469E+02
+.85405023E+01	+.38864047E+02
+.88547326E+01	+.39863674E+02
+.91750036E+01	+.40887991E+02
+.95013453E+01	+.41937694E+02
+.98339619E+01	+.43013570E+02
+.10173032E+02	+.44116320E+02
+.10513727E+02	+.45246743E+02
+.10871230E+02	+.46405663E+02
+.11230736E+02	+.47593911E+02
+.11597406E+02	+.48812315E+02
+.11971469E+02	+.50061757E+02
+.12353102E+02	+.51343315E+02
+.12742514E+02	+.52657753E+02
+.131339917E+02	+.54006180E+02
+.13545530E+02	+.55389556E+02
+.13959577E+02	+.56809076E+02
+.14388268E+02	+.58265679E+02
+.14813841E+02	+.59760697E+02
+.15254558E+02	+.61295141E+02
+.15704646E+02	+.62870322E+02
+.16164341E+02	+.64487654E+02
+.16633925E+02	+.66146303E+02
+.17113645E+02	+.67853699E+02
+.17603791E+02	+.69605400E+02
+.18104631E+02	+.709.0
+.18615460E+02	
+.19129564E+02	
+.19674250E+02	
+.20220003E+02	

TABLA XLV - Datos de equilibrio entalpía/temperatura
a $\pi = 710,0$ mm.Hg.

$t_i^{**} L9RS$	i_{gi}
+00000000E-99	+19120453E+02
0,5 +26291590E+01	+19654515E+02
1,0 +28434076E+01	+20200428E+02
+30607842E+01	+20758560E+02
+32813731E+01	+21329199E+02
+35052709E+01	+21912675E+02
+37325743E+01	+22509366E+02
+39633858E+01	+23119607E+02
+41978016E+01	+23743770E+02
+44359289E+01	+24382215E+02
+46778753E+01	+25035362E+02
+49237435E+01	+25703573E+02
+51736538E+01	+26387269E+02
+54277145E+01	+27086856E+02
+56860479E+01	+27802818E+02
+59487718E+01	+28535548E+02
+62160064E+01	+29285515E+02
+64878929E+01	+30053221E+02
+67645497E+01	+30839120E+02
+70461111E+01	+31643720E+02
- 1,0 +73327151E+01	+32467505E+02
+76245031E+01	+33311063E+02
+79216205E+01	+34174960E+02
+82242054E+01	+35059666E+02
+85324269E+01	+35965860E+02
+88464260E+01	+36894071E+02
+91663619E+01	+37844965E+02
+94923992E+01	+38819166E+02
+98247070E+01	+39817352E+02
+10163459E+02	+40840192E+02
+10508825E+02	+41888370E+02
+10860990E+02	+42962672E+02
+11220145E+02	+44063796E+02
+11586455E+02	+45192541E+02
+11960146E+02	+46349733E+02
+12341396E+02	+47536184E+02
+12730413E+02	+48752739E+02
+13127408E+02	+50000270E+02
+13532601E+02	+51279853E+02
+13946214E+02	+52592250E+02
+14368459E+02	+53938567E+02
+14799572E+02	+55319762E+02
+15239813E+02	+56737027E+02
+15689412E+02	+58191297E+02
+16148603E+02	+59683902E+02
+16617666E+02	+61215849E+02
+17096850E+02	+62788458E+02
+17586443E+02	+64403105E+02
+18086713E+02	+66060986E+02
+18597955E+02	+67763516E+02
	+69512248E+02
	+710.0

TABLA XLVI - Datos de equilibrio entalpía/temperatura
a $\pi = 711,0$ mm.Hg.

6**L99S λ_0	+19101399E+02
+00000000E-99	+19634838E+02
+26256068E+01	+20180109E+02
+28397218E+01	+20737581E+02
+30569603E+01	+21307538E+02
+32774063E+01	+21890311E+02
+35011565E+01	+22486279E+02
+37283072E+01	+23095773E+02
+39589611E+01	+23719166E+02
+41932140E+01	+24356818E+02
+44311729E+01	+25009147E+02
+46729454E+01	+25676515E+02
+49186340E+01	+26359342E+02
+51683587E+01	+27058033E+02
+54222277E+01	+27775071E+02
+56803632E+01	+28504848E+02
+59428827E+01	+29253832E+02
+62099063E+01	+30020525E+02
+64815750E+01	+30805330E+02
+67580039E+01	+31608903E+02
+70393361E+01	+32431576E+02
10p+73257005E+01	+33273988E+02
+76172412E+01	+34136703E+02
+79141034E+01	+35020189E+02
+82164249E+01	+35925125E+02
+85243746E+01	+36852038E+02
+88380933E+01	+37801593E+02
+91577399E+01	+38774411E+02
+94834787E+01	+39771171E+02
+98154786E+01	+40792538E+02
+10153913E+02	+41839196E+02
+10498951E+02	+42911929E+02
+10850778E+02	+44011433E+02
+11209585E+02	+45138505E+02
+1157536E+02	+46293969E+02
+11948856E+02	+47478636E+02
+12329724E+02	+48693347E+02
+12718346E+02	+49938973E+02
+13114935E+02	+51216588E+02
+13519709E+02	+52526951E+02
+13932891E+02	+53871165E+02
+14354690E+02	+55250187E+02
+14785343E+02	+56665204E+02
+15225111E+02	+58117150E+02
+15674222E+02	+59607350E+02
+16132910E+02	+61136809E+02
+16601455E+02	+62706844E+02
+17080104E+02	+64318827E+02
+17569145E+02	+65973949E+02
+18068843E+02	+67673624E+02
+18579504E+02	+69419397E+02
	+711.0

IX-2.2.

Lista de puntos rutinarios a comprobar para la realización de un experimento completo. (Ver la página 5).

Conectar la alimentación eléctrica al conjunto experimental y desconectarla al acabar.

Abrir la llave de paso del agua y cerrarla al acabar.

Abrir la llave de paso del gas combustible y cerrarla al acabar.

Comprobar o instalar debidamente el dispositivo colector del agua caída del relleno, el relleno en sí y el distribuidor de agua al relleno; comprobar cuidadosamente su horizontalidad.

Colocar en posición la pieza de tubería móvil de alimentación de agua al distribuidor.

Comprobar la colocación correcta de los termómetros de aire, agua, de las tomas de muestra del aire y de los termómetros de los psicrómetros.

Comprobar el estado de los manómetros del venturímetro del diafragma y demás manómetros de control, así como

la falta de burbujas en los conductos de agua al manómetro de mercurio y la falta de humedad o gotas en los de aire a los manómetros de columna de agua.

Comprobar el perfecto estado de sequedad de los conductos de aire entre los puntos de toma de muestra y los psicrómetros. Pasar aire, poniendo en funcionamiento la bomba de vacío y aspirando aire seco por ellos, hasta que desaparezca toda la humedad que hubiere.

Comprobar el estado de limpieza del agua en el depósito de agua de recirculación y su nivel normal de trabajo comprobando el buen funcionamiento de la llave reguladora de nivel por flotador. Vaciar dicho depósito y limpiarlo si fuera necesario después de períodos largos de inactividad. Añadir agua hasta alcanzar el nivel normal si es necesario. Con las válvulas en la impulsión cerradas, poner en marcha la bomba de circulación de agua.

Abrir la llave de "by-pass" en el circuito depósito - bomba - desviación de "by-pass" - depósito, comprobando que la válvula de entrada a la torre está cerrada.

Abrir las llaves de paso de entrada y salida a los calentadores a gas cerrando parcialmente la de by-pass para eliminar bien el aire en los serpentines de los calentadores

haciendo circular el agua por ellos.

Abrir ligeramente la llave de drenaje continuo de la instalación permitiendo la salida de un pequeño chorro continuo de agua.

Con la válvula de mariposa cerrada poner en marcha, observando las precauciones de los arranques en estrella/triángulo, el ventilador principal de aire a la torre, abriendo luego gradualmente la válvula de mariposa.

Comprobar el estado de los pabilos de los termómetros húmedos, humedecerlos convenientemente y rellenar con agua destilada los depósitos y parte inferior de los psicrómetros que mantienen en estado húmedo los pabilos por capilaridad.

Abrir completamente la válvula de aspiración directa de aire al sistema de toma de muestras y poner en marcha la bomba de vacío. Cerrar gradualmente la válvula de aspiración de aire exterior directo hasta conseguir el vacío necesario para mantener el caudal de aire de muestra deseado a través de los psicrómetros. Completar el nivel de agua en los psicrómetros y mantenerlo, con adiciones periódicas, entre los límites prácticos.

Abrir gradualmente, para evitar saltos bruscos del manómetro diferencial de mercurio y pasos de posible suciedad a través de las cámaras de calma de dicho manómetro, la válvula de regulación del caudal de agua a la torre para mojar bien el relleno. Después de largos períodos de inactividad era necesario mantener durante unas horas el relleno mojándose antes de comenzar un experimento ya que era indispensable asegurarse de que la torre y el relleno de madera absorben toda el agua necesaria y se saturan convenientemente. La turbulencia debida al paso de aire ayuda a mojar perfectamente el relleno.

Abrir las válvulas de paso de gas combustible a los calentadores; abrir ligeramente la válvula de regulación dejando pasar algo de gas y encender los pilotos de los calentadores. Al cabo de dos minutos dejar pasar gas por los quemadores abriendo la válvula principal de regulación y las de paso de gas a los calentadores.

Calentar rápidamente el agua del sistema de circulación hasta conseguir la temperatura de entrada a la torre que se desea. Durante este calentamiento puede mantenerse un caudal bajo de agua y aire por la torre para tener un enfriamiento reducido y llegar rápidamente a las temperaturas de agua deseadas, disminuyendo el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio térmico del sistema.

Graduar convenientemente el caudal de agua a la torre hasta establecer el caudal deseado.

Graduar con la válvula de mariposa el caudal deseado de aire a la torre.

Ajustar el caudal de gas combustible a los calentadores al valor necesario para mantener el equilibrio térmico del sistema. Debe también ajustarse el número de calentadores en servicio para obtener una buena regulación en los mismos.

Mantener la torre funcionando en esas condiciones durante el tiempo que se estime necesario: mínimo, media hora; máximo, dos horas, si no se ha establecido rápidamente el equilibrio térmico o el relleno no estaba perfectamente saturado de agua y en equilibrio con la que lo moja.

Comprobar y rellenar periódicamente el nivel de agua de alimentación a los pabilos de los termómetros húmedos y la presión de gas combustible a los calentadores.

Anotar periódicamente las dos lecturas psicrométricas, la temperatura del aire a la entrada de la torre y la del agua a la entrada del relleno hasta comprobar la constancia aceptable de estos valores, a partir de cuyo momento pueden comenzar a tomarse las lecturas de los DATOS

EXPERIMENTALES.

IX-2.3.

Cálculo completo de un experimento.

Tomando como ejemplo representativo uno cualquiera de los experimentos realizados, se describe a continuación, en forma detallada, la secuencia de operaciones y cálculos que, a partir de los datos experimentales tomados en la hoja de cálculo, DATOS EXPERIMENTALES, la realización del balance entálpico, reflejado en la hoja de cálculo correspondiente, BALANCE ENTALPICO y el proceso de los datos por el ordenador electrónico cuyos resultados de Pendiente de las líneas de unión e Integral entálpica se anotan en la hoja de cálculo CONSTRUCCION DE MICKLEY, permite calcular finalmente los coeficientes individuales volumétricos de transporte para el relleno en cuestión y las condiciones de operación que han regido en el experimento (Tablas XLVII, XLVIII y XLIX).

Se ha tomado como ejemplo el experimento N^o. 42 para el que el ordenador sacó los datos intermedios del cálculo de la integral entálpica.

Los pasos seguidos en el cálculo fueron los siguientes:

1º) Corrección de las temperaturas leídas: Se hace sobre la misma hoja de cálculo DATOS EXPERIMENTALES, utilizando las curvas de calibrado correspondientes a cada termómetro (figs. 52 y 53), indicándose la temperatura corregida a continuación de la leída (subrayado simple).

2º) Selección de temperaturas medias representativas: Las temperaturas que se obtenían en forma múltiple para disminuir errores, debían promediarse para obtener respectivamente los valores reales de t_2 , T_2 y T_1 . Estos valores se anotan también sobre la misma hoja de cálculo (subrayado doble).

3º) Conversión de las lecturas psicrométricas: Para poder utilizar la gráfica psicrométrica (fig. 54) se convertían las temperaturas seca y húmeda a grados Fahrenheit, anotándose éstos en la misma hoja de cálculo (subrayado doble).

4º) Conversión de lecturas manométricas: Los valores en mm. C.A. se convertían en mm.Hg. dividiendo por la densidad del mercurio y anotando sus valores en la misma hoja de cálculo (subrayado doble).

5º) Presión media en el interior de la torre: Se obtenía sumando a la presión atmosférica la presión en la parte superior del relleno, p_2 , más la mitad de la pérdida de car-

ga de éste, $\Delta p_{rell.}$, en mm.Hg:

$$\pi = 705.14 + 0,15 + 0,5 \cdot 0,18 = 705,38 \text{ mm.Hg.}$$

Se tomó como representativa la presión de 705 mm. Hg, redondeando al mm.Hg. más próximo. Este cálculo se realiza sobre la hoja de cálculo CONSTRUCCION DE MICKLEY para elegir la correspondiente curva de equilibrio en el diagrama entalpía temperatura.

6º) Presión en el interior de los psicrómetros: Era la atmosférica menos 1,70 mm.Hg. que era el vacío en su interior:

$$P_{psicr.} = 705,14 - 1,70 = 703,44 \text{ mm.Hg.}$$

Es necesario conocerla para corregir el efecto de la presión de las lecturas psicrométricas. El valor se anota en la hoja de cálculo BALANCE ENTALPICO.

7º) Presión anteorificio: Era la atmosférica más la presión diferencial anteorificio, p_{ao} , en mm.Hg:

$$p_{ao} = 705,14 + 1,15 = 706,29 \text{ mm.Hg.}$$

TABLA XLVII - Experimento 42 - Datos experimentales.

coeficientes de transferencia
de calor y materia en torres
de enfriamiento de agua.

FCMIQ - TGA

Experiencia: 2 / 7 / 65 - I .

Lecturas: 1^a / 12,10h.
/ h.
/ h.

Nº : 42

DATOS EXPERIMENTALES

Iniciales: lect. JLA
escr. TGA

tipo de relleno: 170 /s 30'io = N /H .

tipo de ensayo: L45 /G 60 = T 28 /t 20/x 0,013

° de calentadores:

Presión de gas a los calentadores: K x

P. atm., mm Hg: 705,14

Temp. amb., °C: 31

Lecturas manométricas.

Δh_L , mm Hg: 43,0

Δh_G , mm CA: 59,0

p_{ao} , mm CA: 15,5 = 1,15 mm.Hg
 Δp relleno, mm CA: 2,5 = 0,18 mm.Hg.
 p_2 , mm CA: 2,0 = 0,15 mm.Hg.

Temperaturas, °C. AIRE = t

AGUA = T

t_{2f} : 26,85 / 26,50
/ /
/ /

$t_2 = 26,35^\circ C$
=====

T_{2f} : 30,50 / 30,50
/ /
/ /

t_{2di} : 26,30 / 26,30
/ /
/ /

t_{2dd} : 26,40 / 26,30
/ /
/ /

T_{2d} : 30,50 / 30,50
/ /
 $T_2 = 30,55^\circ C$
=====

t_{s2} : 28,20 / 27,80 / 82,0°F
/ / /
/ / /

t_{w2} : 23,40 / 24,05 / 75,3°F
/ / /
/ / /

t_{s1} : 30,70 / 30,35 / 86,6°F
/ / /
/ / /

t_{w1} : 17,50 / 17,50 / 62,5°F
/ / /
/ / /

t_1 : 29,95 / 30,25
/ /
/ /

T_{11} : 26,00 / 25,90
/ /
 $T_2 = 26,00^\circ C$
=====

T_{12} : /
/
/

Se necesita conocer para hallar el factor de corrección, F, del venturímetro. Se anota en la hoja de cálculo BALANCE ENTALPICO.

8º) Humedad del aire: Psicrómetro para aire de entrada a la torre; se entra en la figura 54 con los valores de las temperaturas seca y húmeda correspondientes: $t_{s1} = 86,6^{\circ}\text{F}$, $t_{w1} = 62,5^{\circ}\text{F} :: x_1' = 0,00680 \text{ Kg/Kg.A.S.}$ Corrección por la presión en el interior del psicrómetro con la gráfica de la figura 55, en la que se entra con los valores $P_{\text{psicr.}} = 703,44 \text{ mm.Hg.}$ y $t_{w1} = 16,95^{\circ}\text{C} :: \Delta x_1 = 0,0102 \text{ Kg/Kg.A.S.}$

Humedad absoluta del aire a la entrada, $x_1 = x_1' + \Delta x_1 = 0,00782 \text{ Kg/Kg.A.S.}$

Humedad relativa del aire a la entrada $\varphi_1 = 24 \%$, para el cálculo del factor F del venturímetro.

Psicrómetro de salida: $t_{s2} = 82,0^{\circ}\text{F}$, $t_{w2} = 75,3^{\circ}\text{F}$

$x_2' = 0,01745 \text{ Kg/Kg.A.S.}$ $\Delta x_2 = 0,00154 \text{ Kg/Kg.A.S.}$

$x_2 = 0,01899 \text{ Kg/Kg.A.S.}$ $\varphi_2 = 73 \%$ (aire no saturado, se comprueba).

Estos datos se reflejan en la hoja de cálculo BALANCE ENTALPICO.

9º) Caudal de agua: Mediante la gráfica de la figura 51 se obtiene, entrando con el valor $\Delta h_L = 43 \text{ mm.Hg.}$, el caudal

TABLA XLVIII - Experimento 42 - Balance entálpico

Coefficientes de transferencia de calor y materia en torres de enfriamiento de agua.

Experiencia: 2 / 7 / 65 - I .

Lectura: 1ª / 12,10 h.

Nº : 42

Iniciales: TGA

Fecha balance:

FCMIQ - TGA

BALANCE ENTALPICO

Agua.

Δh_L , mm Hg: 43,0

L_m , Kg/h: 3.825

T_2 , °C: 30,55

T_1 , °C: 26,00

$T_2 - T_1 = 4,55$

$L_m C_L (T_2 - T_1) = \Delta I_L$, Kcal/h: 17.310

Aire.

$P_{psicr.}$, mm Hg: 703,44

t_{s2} = 27,80 °C = 82,0 °F

t_{w2} = 24,05 °C = 75,3 °F

t_2 , °C: 26,35

x'_2 , KgH₂O/Kg AS: 0,01745

$\Delta x'_2$ " : 0,00154

x_2 " : 0,01899

t_{s1} = 30,35 °C = 86,6 °F

t_{w1} = 17,50 °C = 62,5 °F

t_1 , °C:

x'_1 , KgH₂O/KgAS: 0,00680

$\Delta x'_1$ " : 0,00102

x_1 " : 0,00782

$0,241t_2$: 6,32

$0,446t_2x_2$: 0,23

$597,2x_2$: 11,30

$0,241t_1$: 7,26

$0,446t_1x_1$: 0,11

$597,2x_1$: 4,65

i_{G2} , Kcal/KgAS: 17,85

i_{G1} , Kcal/KgAS: 12,02

ϕ_1 , %: 24

P_{ao} , mm Hg: 1,15

π_{ao} , mm Hg: 706,29

F = 0,967

Δh_G , mm CA: 59,0

G, Kg/h: 3.150

$i_{G2} - i_{G1} = 5,80$

$G(i_{G2} - i_{G1}) = \Delta I_G$, Kcal/h: 18.280

Error entálpico, E_L " : + 970

Error relativo, ϵ_L % = + 5,6

de agua. $M = 3.825 \text{ Kg/h}$, indicado en la hoja de cálculos.

10º) La gráfica de la figura 50 da un caudal no corregido $G' = 3.280 \text{ Kg.AS/h}$ entrando en ella con el valor $\Delta h_G = 59 \text{ mm.C.A.}$ El factor de corrección F , para las condiciones reales del aire $t = 30,25^\circ\text{C}$, $\pi_{ao} = 706,29 \text{ mm.Hg}$ y $\varphi_1 = 24 \%$, se obtiene por la gráfica de la figura 49, resultando un valor de $F = 0,967$. El caudal real de aire es pues $M_G = 3.280 \times 0,967 = 3.150 \text{ Kg/h}$; este valor se registra.

11º) Balance entálpico del agua: Se calcula en la hoja correspondiente:

$$\begin{aligned} M_L \times C_L (T_2 - T_1) &= 3.825 \times 1,000 (30,55 - 26,00) = \\ &= 3.825 \times 4,55 = 17.310 \text{ Kcal/h.} \end{aligned}$$

12º) Balance entálpico del aire: Entalpía específica del aire a la entrada,

$$\begin{aligned} i_{G_1} &= 0,241 \times 30,25 + 0,446 \times 30,25 \times 0,00782 + \\ &+ 597,2 \times 0,00782 = 7,26 + 0,11 + 4,65 = \\ &= 12,02 \text{ Kcal/Kg.A.S.} \end{aligned}$$

Entalpía específica del aire a la salida,

$$\begin{aligned} i_{G2} &= 0,241 \times 26,35 + 0,446 \times 26,35 \times 0,01899 + \\ &+ 597,2 \times 0,01899 = 6,32 + 0,23 + 11,30 = \\ &= 17,85 \text{ Kcal/Kg.A.S.} \end{aligned}$$

Balance entálpico del aire:

$$\begin{aligned} M_G(i_{G2} - i_{G1}) &= 3.150 (17,95 - 12,02) = \\ &= 3.150 \times 5,80 = 18.280 \text{ Kcal/h.} \end{aligned}$$

13º) Error entálpico absoluto:

$$E_L = 18.280 - 17.310 = 970 \text{ Kcal/h.}$$

14º) Error relativo del balance entálpico:

$$\epsilon_L = \frac{970}{17.310} \times 100 = 7,3 \%$$

Valor inferior al 10 % por lo que se consideran válidos los datos experimentales.

Se pasan a la hoja de cálculos CONSTRUCCION DE MICKLEY los de temperaturas y entalpías específicas de los

cuatro puntos de la construcción de Mickley y el de la presión en el interior de la torre y se toman como base para elaborar la construcción de Mickley por el ordenador electrónico.

15º) Obtención de la función $i_{G_i} = f(t_i, \pi)$: El ordenador electrónico, alimentado con la primera parte del programa, obtiene la función $i_{G_i} = f(t_i, 705)$ en forma de cinta perforada de salida S-1-705. (En la Tabla XL se ha incluido anteriormente dicha función correspondiente a la presión atmosférica de 705 mm. Hg.).

16º) Perforación de la cinta con los datos experimentales: Se obtiene en el ordenador la cinta perforada E-2-705/42 que contiene los cuatro puntos experimentales en el diagrama entalpía/temperatura, ordenados consecutivamente como se indica en la hoja de cálculo CONSTRUCCION DE MICKLEY.

17º) Proceso de los datos y tanteo gráfico de Mickley: El ordenador se alimentaba con la segunda parte del programa, a continuación se introducía la función $i_{G_i} = f(t_i, 705)$ en forma de cinta perforada S-1-705 y finalmente los datos experimentales a procesar, contenidos en la cinta de entrada E-2-705/42. Una vez comunicada a la máquina la consigna del número de "escalones" de tanteo, 30 en general, el orde-

coeficientes de transferencia
de calor y materia en torres
de enfriamiento de agua.

FCMIQ - TGA

CONSTRUCCION DE MICKLEY

P.atm., mm Hg : 705,14
 P_2 , " : 0,15
 $\frac{1}{2}\Delta p$ relleno, mm Hg: 0,09
 P_m torre, π , " : 705,38 = 705

Datos IBM-1620

ENTRADA E = 2-705/42

Cinta de salida: S - 1 - 10
 Orden de puntos: 1 - 2 - 3 - 4
 Formato: XX.XX

1 t_1 : 30,25
 i_{G1} 12,02

2 T_1 : 26,00
 i_{G1} : 12,02

3 T_2 : 30,55
 i_{G2} : 17,85

4 t_2 : 26,35
 i_{G2} : 17,85

Coefficientes volumétricos individuales

$$\frac{M}{S} = \frac{3.150}{0,483} = G = \frac{6.520}{1} \text{ KgAS/h.m}^2$$

$$l = 0,354 \text{ m}$$

$$x_1 = 0,0078$$

$$x_2 = 0,0190$$

$$0,0268 + 0,241 = 0,006$$

$$S_m = 0,247$$

$$\frac{G}{l} \cdot \text{Integral} = \frac{k' \cdot a}{\pm 300} = \frac{27.100}{\pm 300} \text{ Kg/h.m}^3 \Delta x$$

$$S_m \cdot k' \cdot a = h_{G,a} = \frac{6.700}{\pm 80} \text{ Kcal/h.m}^3 \Delta x$$

$$k' \cdot a \cdot \text{Pendiente} = h_{L,a} = \frac{29.800}{\pm 1.100} \text{ Kcal/h.m}^3 \Delta x$$

Superficie específica de contacto, m^2/m^3

Porcentaje de volumen hueco del relleno, %

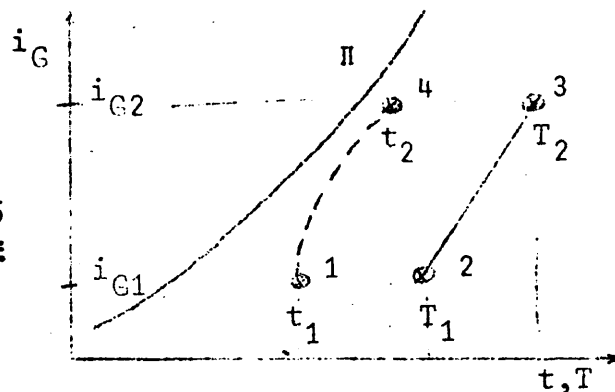
Experiencia: 2 / 7 / 65 - I

Lectura: 1ª / 12,10 h.

Nº :

Iniciales:

Fecha IBM:



SALIDA

Pend. inferior = 1,070

Pend. superior = 1,124

Integral inf. = 1,489

Integral sup. = 1,454

Pendiente = 1,097 \pm 0,027

Integral = 1,471 \pm 0,017

nador procesaba los datos y realizaba los cálculos para dar, en forma de cinta perforada S-2-705/42 dos series de valores correspondientes a los sucesivos puntos (i_{G_i}, t_i) (i_G, t) del tanteo, correspondientes a los valores "máximo" y "mínimo" de la Pendiente que "cuadran" la construcción de Mickley para los valores máximo y mínimo de t_2 : $t_2 + 0,05^\circ\text{C}$ y $t_2 - 0,05^\circ\text{C}$.

En el caso de este experimento la máquina sacó también la cinta en lenguaje escrito que corresponde a las tablas adjuntas .

18º) Obtención de la Pendiente y la Integral:

El ordenador se alimentaba con la tercera parte del programa y la cinta de salida producida en la fase anterior de proceso y tanteo, S-2-10/1, y calculaba rápidamente el valor de la Integral entálpica, correspondiente a las pendientes máxima y mínima de la construcción de Mickley, dando finalmente como resultado global el resumen de los datos de partida (presión y coordenadas de los cuatro puntos base), los valores de la Pendiente inferior y superior, las temperaturas t_2 a las que dichas pendientes correspondían, y los valores de la Integral inferior y superior. Se incluye copia de dichos datos y resultados tal y como los producía la máquina.

TABLA L - Experimento 42 - Listado de la cinta de salida S-2-705/42.

	+30.250000E00 - t_1		+27.098526E-00
1	+12.020000E-00 - t_{G1}	13	+14.351996E-00
	+22.035947E-00 - t_{G1}		+24.125183E-00
	+16.261667E-00 - t_{G1}		+18.305563E-00
	+29.873672E-00		+26.952375E-00
2	+12.214333E-00	14	+14.546329E-00
	+22.213071E-00		+24.295129E-00
	+16.428759E-00		+18.480336E-00
	+29.520432E-00		+26.821112E-00
3	+12.408666E-00	15	+14.740662E-00
	+22.390196E-00		+24.465076E-00
	+16.595851E-00		+18.655108E-00
	+29.189508E-00		+26.704147E-00
4	+12.602999E-00	16	+14.934995E-00
	+22.566644E-00		+24.633578E-00
	+16.763665E-00		+18.831426E-00
	+28.880173E-00		+26.600879E-00
5	+12.797332E-00	17	+15.129328E-00
	+22.741992E-00		+24.801706E-00
	+16.932658E-00		+19.008144E-00
	+28.591720E-00		+26.510739E-00
6	+12.991665E-00	18	+15.323661E-00
	+22.917339E-00		+24.969835E-00
	+17.101651E-00		+19.184861E-00
	+28.323418E-00		+26.433186E-00
7	+13.185998E-00	19	+15.517994E-00
	+23.091740E-00		+25.136463E-00
	+17.271657E-00		+19.363184E-00
	+28.074575E-00		+26.367651E-00
8	+13.380331E-00	20	+15.712327E-00
	+23.265297E-00		+25.302763E-00
	+17.442567E-00		+19.541858E-00
	+27.844505E-00		+26.313613E-00
9	+13.574664E-00	21	+15.906660E-00
	+23.438853E-00		+25.469064E-00
	+17.613476E-00		+19.720532E-00
	+27.632522E-00		+26.270580E-00
10	+13.768997E-00	22	+16.100993E-00
	+23.611245E-00		+25.633873E-00
	+17.785632E-00		+19.900801E-00
	+27.437965E-00		+26.238017E-00
11	+13.963330E-00	23	+16.295326E-00
	+23.783001E-00		+25.798341E-00
	+17.958467E-00		+20.081435E-00
	+27.260179E-00		+26.215450E-00
12	+14.157663E-00	24	+16.489659E-00
	+23.954759E-00		+25.962808E-00
	+18.131302E-00		+20.262070E-00

TABLA L - (Continuación)

... / ...

	+26.202436E-00		+30.250000E-00 - t_1
	+16.683992E-00	1	+12.020000E-00 - i_{q1}
	+26.125846E-00		+22.139656E-00 - t_{i1}
25	+20.444235E-00		+16.359502E-00 - i_{q1}
	+26.198478E-00		+29.886800E-00
	+16.878325E-00	2	+12.214333E-00
26	+26.288466E-00		+22.316114E-00
	+20.626847E-00		+16.525966E-00
	+26.203143E-00		+29.545576E-00
27	+17.072658E-00	3	+12.408666E-00
	+26.451086E-00		+22.492573E-00
	+20.809459E-00		+16.692429E-00
	+26.216037E-00		+29.225617E-00
28	+17.266991E-00	4	+12.602999E-00
	+26.612413E-00		+22.667379E-00
	+20.993455E-00		+16.860749E-00
	+26.236707E-00		+28.926285E-00
29	+17.461324E-00	5	+12.797332E-00
	+26.773184E-00		+22.842113E-00
	+21.178044E-00		+17.029151E-00
	+26.264757E-00		+28.646889E-00
30	+17.655657E-00	6	+12.991665E-00
	+26.933955E-00		+23.016679E-00
	+21.362635E-00		+17.197742E-00
→	+26.299838E-00 - 26.30		+28.386757E-00
	+17.849990E-00	7	+13.185998E-00
	+27.093634E-00		+23.189674E-00
	+21.548394E-00		+17.368098E-00
			+28.145260E-00
		8	+13.380331E-00
			+23.362669E-00
			+17.538455E-00
			+27.921743E-00
		9	+13.574664E-00
			+23.535304E-00
			+17.709216E-00
			+27.715571E-00
		10	+13.768997E-00
			+23.706551E-00
			+17.881538E-00
			+27.526130E-00
		11	+13.963330E-00
			+23.877798E-00
			+18.053859E-00
			+27.352805E-00
		12	+14.157663E-00
			+24.048541E-00
			+18.226747E-00

... / ...

TABLA L - (Continuación)

... / ...

	+27.194999E-00		
13	+14.351996E-00		+16.295326E-00
	+24.218029E-00	23	+25.884457E-00
	+18.401046E-00		+20.176018E-00
	+27.052121E-00		+26.324020E-00
14	+14.546329E-00		+16.489659E-00
	+24.387516E-00	24	+26.048080E-00
	+18.575346E-00		+20.356910E-00
	+26.923599E-00		+26.310154E-00
15	+14.740662E-00	25	+16.683992E-00
	+24.556409E-00		+26.210437E-00
	+18.750314E-00		+20.539226E-00
	+26.808871E-00		+26.305128E-00
16	+14.934995E-00	26	+16.878325E-00
	+24.724127E-00		+26.372793E-00
	+18.926602E-00		+20.721542E-00
	+26.707375E-00		+26.308549E-00
17	+15.129328E-00	27	+17.072658E-00
	+24.891847E-00		+26.534759E-00
	+19.102889E-00		+20.904296E-00
	+26.618584E-00		+26.320021E-00
18	+15.323661E-00	28	+17.266991E-00
	+25.058934E-00		+26.695314E-00
	+19.279887E-00		+21.088636E-00
	+26.541973E-00		+26.339104E-00
19	+15.517994E-00	29	+17.461324E-00
	+25.224874E-00		+26.855868E-00
	+19.458174E-00		+21.272979E-00
	+26.477013E-00		+26.365450E-00
20	+15.712327E-00	30	+17.655657E-00
	+25.390815E-00		+27.016238E-00
	+19.636460E-00		+21.457527E-00
	+26.423222E-00		+26.398715E-00 = <u>26,40°</u>
21	+15.906660E-00		+17.849990E-00
	+25.556145E-00		+27.174983E-00
	+19.815434E-00		+21.643902E-00
	+26.380114E-00		
22	+16.100993E-00		
	+25.720301E-00		
	+19.995726E-00		
	+26.347192E-00		

... / ...

TABLA L - (Continuación)

... / ...

PRESION = +705.0
PUNTO 1 +12.02 +30.25
PUNTO 2 +12.02 +26.00
PUNTO 3 +17.85 +30.55
PUNTO 4 +17.85 +26.35

PEND. INFERIOR = +1.070
PEND. SUPERIOR = +1.124

T INFERIOR = +26.2998
T SUPERIOR = +26.3987

INTEGRAL INF. = +.148925+01

INTEGRAL SUP. = +.145376+01

TABLA LI - Experimento 42. Resultados
finales dados por el ordenador.

PRESION = +705.0

PUNTO 1 +12.02 +30.25

PUNTO 2 +12.02 +26.00

PUNTO 3 +17.85 +30.55

PUNTO 4 +17.85 +26.35

PEND. INFERIOR = +1.070

PEND. SUPERIOR = +1.124

T INFERIOR = +26.2998

T SUPERIOR = +26.3987

INTEGRAL INF. = +.148925E+01

INTEGRAL SUP. = +.145376E+01

Dichos resultados se pasaban a la hoja de cálculo CONSTRUCCION DE MICKLEY para proseguir con el de los coeficientes individuales volumétricos de transporte.

19º) Valores medios de la Pendiente y la Integral:

$$\text{Pendiente} = 1,097 \pm 0,027 ; \quad E = 4,9 \%$$

$$\text{Integral} = 1,471 \pm 0,017 ; \quad E = 2,3 \%$$

También se obtiene el error del método suponiendo exactos todos los valores excepto el de la temperatura del aire a la salida de la torre.

20º) Cálculo final del coeficiente k'a:

$$k'a = \text{Integral} \cdot \frac{G}{1} =$$

$$= (1,471 \pm 0,017) \cdot \frac{M_G}{S.l} =$$

$$= (1,471 \pm 0,017) \cdot \frac{3.150}{0,483 \cdot 0,354} =$$

$$= \underline{\underline{27.100 \pm 300 \text{ Kg/h.m}^3 \cdot \Delta x}}$$

21º) Cálculo final del coeficiente h_{Ga} :

$$\begin{aligned} h_{Ga} &= k'a \cdot s_m = (27.100 \pm 300) \cdot 0,247 = \\ &= 6.700 \pm 80 \text{ Kcal/h.m}^3.\text{°C} \\ &===== \end{aligned}$$

22º) Cálculo final del coeficiente h_{La} :

$$\begin{aligned} h_{La} &= \text{Pendiente} \cdot k'a = \\ &= (1,097 \pm 0,027) \cdot (27.100 \pm 300) = \\ &= 29.800 \pm 1.100 \text{ Kcal/h.m}^3.\text{°C}. \\ &===== \end{aligned}$$

IX-2.4.

Procedimiento de cálculo por mínimos cuadrados de puntos "ponderados" seguido para obtener una ecuación representativa.

La ecuación representativa de los puntos experimentales de $k'a$ en función de G en escala semilogarítmica a $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$, descrita en la discusión de resultados, se obtuvo como otras, por un método "ponderado" consistente en aplicar mínimos cuadrados no al número real de experimentos en cuestión, nueve en este caso, sino a un total ficticio de 100 experimentos agrupados en nueve conjuntos dis-

tintos, y cada conjunto constituido por un número $K/\epsilon\%$ de experimentos iguales inversamente proporcional al error relativo $\epsilon\%$ con que se ha obtenido el valor de $k'a$, que es un dato deducible de los resultados suministrados por el ordenador electrónico. El método de mínimos cuadrados se aplicó primero geométricamente a figuras ampliadas, y una vez deducida la forma de la recta representativa se obtenía analíticamente su expresión. El desarrollo de datos para calcular la ecuación representativa de los experimentos 1 á 9 fué el siguiente:

Expe- rimen- to.	mm (log k'a)	$\epsilon\%$ error	1 $\epsilon\%$	K $\epsilon\%$	$(\log k'a)^2$	mm (G)	(log k'a)G
1	11,5	1,8	0,56	17	132	35,5	408
2	37,0	2,4	0,42	13	1.370	59,5	2.200
3	37,5	3,3	0,30	9	1.405	77,5	2.905
4	50,5	3,1	0,32	9	2.550	101,5	5.125
5	65,0	3,6	0,28	9	4.230	127,5	8.290
6	71,0	2,1	0,48	14	5.050	145,5	10.050
7	70,5	2,1	0,48	14	4.975	164,0	11.570
8	110,0	3,7	0,27	8	12.150	196,5	21.620
9	134,5	4,1	0,23	7	18.150	220,0	29.600
			3,34	100			

$$\sum k'a \times \frac{K}{\varepsilon\%} = 5.858 ; \quad \sum (k'a)^2 \times \frac{K}{\varepsilon\%} = 458.445 ;$$

$$\sum G \times \frac{K}{\varepsilon\%} = 11.580 ; \quad \sum (k'a) \times G \times \frac{K}{\varepsilon\%} = 865.455 .$$

$$n = 100 ; \quad \overline{k'a} = 58,58 \text{ mm.} ; \quad \overline{G} = 115,8 \text{ mm.}$$

Geométricamente $y = a + bx$

$$b = \frac{865.455 - \frac{5.858 \times 11.580}{100}}{458.445 - \frac{5.858^2}{100}} = 1.62$$

$$a = 115,8 + 1,62 (- 58,58) = 20.8$$

y conocidos los parámetros de la recta representativa en el papel semilogarítmico se deduce su ecuación en forma algebraica:

$$G = 3.020 + \frac{7.040 - 3.020}{\log 24.800 - \log 10.000} (\log k'a - \log 10.000);$$

$$10.180 \log k'a = 37.690 + G, \text{ o sea}$$

$$\log k'a = 3,70 + 0,982 \times 10^{-4} G \quad (50)$$

que es la ecuación buscada.

IX-2.5.

Cálculo de errores.

El desarrollo de los cálculos mediante el ordenador hizo posible determinar con exactitud el efecto que tienen los errores con que se obtienen las medidas de datos experimentales, sobre los resultados de los coeficientes volumétricos de transporte.

Los errores medios de la "pendiente" y la "integral" en función de los errores de las medidas se han obtenido estudiando la media de errores de varios experimentos y no son errores máximos sino errores medios más probables. Los errores en la pendiente y la integral debidos a fluctuaciones de $\pm 0,05^\circ\text{C}$ en t_2 oscilaban, según los experimentos entre el 5 y el 7,5 % para la pendiente (valor medio 7 %), y entre 2,0 y 3,0 % para la integral (valor medio 2,5 %). Como sobre la pendiente y la integral también influyen, y en mayor proporción las temperaturas y entalpías de los cuatro puntos de la construcción de Mickley, se calculó el efecto de sus errores como múltiplo de los datos indicados deduciéndose que por término medio el error total de pendiente e integral era 3 veces el debido a la fluctuación de t_1 .

Una observación referente a los errores del método fué que los valores de la pendiente y la integral calculados gráficamente a mano comparados con los deducidos por el ordenador eran suficientemente exactos pues la incidencia elevada del error de los datos experimentales en los valores de pendiente e integral, calculada por el ordenador hace que se absorba la diferencia del error de cálculo manual.

La Tabla LII resume los efectos individuales debidos al error de medida de los datos experimentales sobre el error con que se obtienen los tres coeficientes.

Se observa claramente que las magnitudes más susceptibles de producir error son las temperaturas húmedas de los psicrómetros y la temperatura del aire a la salida, para cuya determinación se habían tomado precauciones especiales.

Los errores medios más probables con que se obtienen los tres coeficientes resultaron ser del siguiente orden:

Coeficiente individual volumétrico de transferencia de materia en la fase gaseosa.

$$\begin{aligned}\epsilon_{k'a} &= \epsilon_G + \epsilon_l + \epsilon_{\text{Integral}} = \\ &= 2,5 + 3,5 + 8 = 14 \%\end{aligned}$$

Sin embargo, tomando la altura de relleno como parámetro constante en todos los experimentos, el error del método sería $\epsilon_{k'a} \simeq 10 \%$.

Coeficiente individual volumétrico de transmisión de calor en la fase gaseosa.

$$\epsilon_{h_{Ga}} = \epsilon_{k'a} + \epsilon_{s_m} = 14 + 1 = 15 \%,$$

o bien, si consideramos la altura de relleno como parámetro,

$$\epsilon_{h_{Ga}} \simeq 11 \%.$$

Coeficiente individual volumétrico de transmisión de calor en la fase líquida.

$$\epsilon_{h_{La}} = \epsilon_{k'a} + \epsilon_{\text{Pendiente}} = 10 + 23 = 33 \%$$

TABLA LII - Efecto de los errores de medida sobre los resultados finales.

Medida	Error absoluto y relativo.	Error más probable.	Observaciones	Efecto sobre los coeficientes en error relativo, %.		
				k'a	h _{ga}	h _{La}
Presión atmosférica.	0,1 mm.Hg	1 mm.Hg	Por método seguido se evita error sistemático.	Despreciable (0,20 %)		
Δh_L	0,5 á 1 mm.Hg	2 %	Influye sólo en el balance entálpico.	No influye directamente.		
Δh_G	0,5 á 3 mm.CA	2,5 %	Influencia directa sobre los tres coeficientes.	2,5%	2,5%	2,5%
t ₂	±0,10 á 0,20°C	±0,15°C	Doble determinación	7,5%	7,5%	22 %
T ₂	±0,05 á 0,10°C	±0,07°C	Doble determinación	3,5%	3,5%	10 %
t ₁	±0,10 á 0,20°C	±0,07°C	Fluctúa	3,5%	3,5%	10 %
T ₁	±0,10 á 0,20°C	±0,07°C	Doble determinación	3,5%	3,5%	10 %
t _{s1}	±0,05 á 0,15°C	±0,10°C		3 %	3 %	10 %
t _{w1}	±0,10 á 0,20°C	±0,15°C	Mucha influencia sobre la entalpía	7 %	7 %	20 %

... / ...

TABLA LII - (Continuación)

... / ...

t_{s2}	$\pm 0,05$ á $0,15$ °C	$\pm 0,10$ °C		4 %	4 %	15 %
t_{w2}	$\pm 0,10$ á $0,20$ °C	$\pm 0,15$ °C	Mucha influencia sobre la entalpía.	10 %	10 %	30 %
Altura de relleno.	1 cm.	1 cm.	Puede considerarse como parámetro.	3,5 %	3,5 %	3,5 %

IX-2.6.

Localización de los datos experimentales.

Tanto los datos experimentales como los cálculos realizados durante el desarrollo de la presente investigación se encuentran archivados en la Cátedra de Química Técnica de la Universidad de Madrid.

X - N O M E N C L A T U R A
=====

X - NOMENCLATURA

- A - Superficie interfacial aire-agua, m^2 .
- a - Superficie de contacto aire-agua por unidad de volumen de relleno, m^2/m^3 .
- a_H - Superficie de contacto por unidad de volumen útil para la transmisión de calor, m^2/m^3 .
- a_M - Superficie de contacto por unidad de volumen útil para la transferencia de materia, m^2/m^3 .
- C_{AS} - Calor específico del aire seco, Kcal/Kg. $^{\circ}$ C.
- C_L - Calor específico del agua, Kcal/Kg. $^{\circ}$ C.
- C_V - Calor específico del vapor de agua, Kcal/Kg. $^{\circ}$ C.
- G - Velocidad másica del aire seco, Kg/h. m^2 .
- h_G - Coeficiente individual de transmisión de calor a través de la fase gaseosa, Kcal/h. m^2 . $^{\circ}$ C.

- h_C - Coeficiente individual de transmisión de calor por conducción y convección, Kcal/h.m².°C.
- Δh_G - Diferencia de alturas manométricas del venturímetro, mm.C.A.
- Δh_L - Diferencia de alturas manométricas del diafragma, mm.Hg.
- i_G - Entalpía especifica del aire, Kcal/Kg.
- i_L - Entalpía específica del agua, Kcal/Kg.
- k' - Coeficiente individual de transferencia de materia a través de la fase gaseosa, Kg/h.m². Δx .
- K' - Coeficiente global de transferencia de materia, Kg/h.m². Δx .
- k_G - Coeficiente individual de transferencia de materia a través de la fase gaseosa, Kg.moles/h.m². Δx .
- l - Altura de relleno, m.
- L - Velocidad másica del agua, Kg/h.m².
- M_G - Caudal de aire seco, Kg/h.
- M_L - Caudal de agua, Kg/h.

- N_v - Caudal molar de vaporización del agua por unidad de superficie, Kg.moles/h.m².
- π - Presión atmosférica, mm.Hg.
- p - Presión parcial, mm.Hg.
- r - Calor latente de vaporización del agua, Kcal/Kg.
- s - Calor específico del aire húmedo, Kcal/Kg.°C.
- S - Sección transversal de la columna, m².
- T - Temperatura del agua. °C.
- t - Temperatura del aire, °C.
- t_s - Temperatura seca del aire, °C.
- t_w - Temperatura húmeda del aire, °C.
- V - Volumen de relleno, m³.
- x - Humedad absoluta del aire, Kg.agua/Kg.A.S.

Subíndices.

- 1 - Parte inferior de la columna.
- 2 - Parte superior de la columna.
- G - Fase gaseosa.
- L - Fase líquida.

i - Interfase.

ml - Media logarítmica.

a.o. - Condiciones anteorificio.

I N D I C E S

XI - INDICE DE ECUACIONES
=====

(1) $dM_L = M_G dx$ (pág. 14)

(2) $M_G di_G = d(M_L i_L) = M_L di_L + i_L dM_L$ (pág. 15)

(3) $i_G = r_O x + st$ (pág. 16)

(4) $i_L = C_L T$ (pág. 16)

(5) $di_G = r_O dx + sdt + tds$ (pág. 16)

(6) $di_L = C_L dT + TdC_L$ (pág. 16)

(7) $\bar{M}_L = \frac{M_{L1} + M_{L2}}{2}$ (pág. 16)

(8) $M_G r_O dx + M_G sdt = M_G di_G = \bar{M}_L C_L dT$ (pág. 17)

$$(9) \quad dA_M = a_M S \, dl \quad (\text{Pág. 17})$$

$$(10) \quad N_V = \frac{M_G dx}{18 \cdot dA_M} = \frac{M_G dx}{18 \cdot a_M S dl} = k_G (p_i - p) \quad (\text{pág. 17})$$

$$(11) \quad p - p_i = \frac{29}{18} (\pi - p)_{ml} (x - x_i) \quad (\text{pág. 18})$$

$$(12) \quad M_G dx = a_M S dl \cdot k_G \cdot \frac{29}{18} (\pi - p)_{ml} (x_i - x) \quad (\text{pág. 18})$$

$$(13) \quad k_G \cdot \frac{29}{18} (\pi - p)_{ml} = k' \quad (\text{pág. 18})$$

$$(14) \quad M_G dx = k' a_M S dl (x_i - x) \quad (\text{pág. 18})$$

$$(15) \quad M_G s dt = h_C a_H S dl (t_i - t) \quad (\text{pág. 19})$$

$$(16) \quad r_O M_G dx = r_O k' a_M S dl (x_i - x) \quad (\text{pág. 19})$$

$$(17) \quad di_G = s dt + t ds + r_O dx \simeq s dt + r_O dx \quad (\text{pág. 19})$$

$$(18) \quad M_G di_G = h_C a_H S dl (t_i - t) + r_O k' a_M S dl (x_i - x) \quad (\text{pág. 20})$$

$$(19) \quad M_L C_L dT = h_L a_H S dl (T - t_i) \quad (\text{pág. 20})$$

(20)

$$1 = \frac{1}{k'a_M} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x_i - x} = \frac{1}{h_C a_H} \cdot \frac{M_G s}{S} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t_i - t} =$$

$$= \frac{1}{h_L a_H} \cdot \frac{M_L C_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T - t_i} \quad (\text{pág. 21})$$

(21)

$$\frac{h_C}{k's} \approx 1 \quad (\text{pág. 23})$$

(22)

$$a_M \simeq a_H \simeq a \quad (\text{pág. 23})$$

(23)

$$M_G di_G = k'aSdl \left[(st_i + r_o x) - (st + r_o x) \right] \quad (\text{pág. 24})$$

(24)

$$s \simeq s_i \quad (\text{pág. 24})$$

(25)

$$M_G di_G = k' . a . S . dl (i_{G_i} - i_G) \quad (\text{pág. 24})$$

(26)

$$\overline{M}_L C_L dT = k'aSdl (i_{G_i} - i_G) \quad (\text{pág. 24})$$

(27)

$$k' \cdot a \frac{V}{M_G} = \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 25})$$

(28)

$$k' \cdot a \frac{V}{M_L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 25})$$

(29)

$$V = S \cdot l \quad (\text{pág. 25})$$

(30)

$$l = \frac{1}{k' \cdot a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 26})$$

(31)

$$l = \frac{1}{k' \cdot a} \cdot \frac{M_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 26})$$

$$(32) \quad 1 = (H_G) (N_G) \quad (\text{pág. 26})$$

$$(33) \quad 1 = (H_L) (N_L) \quad (\text{pág. 26})$$

$$(34) \quad H_G = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{M_G}{S} \quad (\text{pág. 26})$$

$$(35) \quad H_L = \frac{1}{k'a} \cdot \frac{M_L}{S} \quad (\text{pág. 27})$$

$$(36) \quad N_G = \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 27})$$

$$(37) \quad N_L = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{Gi} - i_G} \quad (\text{pág. 27})$$

$$(38) \quad h_L a_H (T - t_i) = k'a (i_{Gi} - i_G) \quad (\text{pág. 28})$$

(39)

$$\frac{i_{G_i} - i_G}{t_i - T} = - \frac{h_L}{k'}$$

(pág. 28)

(40)

$$\frac{1}{k'a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{G_i} - i_G} =$$

$$= \frac{1}{K'a} \cdot \frac{M_G}{S} \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_{GT} - i_G} = 1$$

(pág. 31)

(41)

$$\frac{1}{k'a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{G_i} - i_G} =$$

$$= \frac{1}{K'a} \cdot \frac{\bar{M}_L}{S} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_L dT}{i_{GT} - i_G} = 1$$

(pág. 31)

$$(42) \quad M_G di_G = k'aSdl(i_{G_i} - i_G) = K'aSdl (i_{G_T} - i_G) \quad (\text{pág. 33})$$

$$(43) \quad M_G sdt = h_G a_H Sdl (t_i - t) = K'aSdl (t_i - t) \quad (\text{pág. 34})$$

$$(44) \quad M_G dt = k'aSdl (t_i - t) \quad (\text{pág. 34})$$

$$(45) \quad \frac{di_G}{dt} = \frac{i_{G_i} - i_G}{t_i - t} \quad (\text{pág. 35})$$

$$(46) \quad \frac{(i_{G_i} - i_G)}{(t_i - t)_1} = \left(\frac{di_G}{dt} \right)_1 \simeq \left(\frac{\Delta i_G}{\Delta t} \right)_1 \quad (\text{pág. 36})$$

$$(47) \quad k'a = \frac{G}{l} \int_{i_{G_1}}^{i_{G_2}} \frac{di_G}{i_{G_i} - i_G} = \frac{G}{l} \cdot \text{Integral} \quad (\text{pág. 81})$$

$$(48) \quad h_G a = k'a \cdot s_m \quad (\text{pág. 81})$$

$$(49) \quad h_L a = k'a \frac{i_{G_i} - i_G}{T - t_i} = k'a \cdot \text{Pendiente} \quad (\text{pág. 81})$$

$$(50) \quad \log k'a = 3,70 + 0,982 \times 10^{-4} G \quad (\text{pág. 169})$$

$$(51) \quad \log k'a = 3,42 + 1,117 \times 10^{-4} G \quad (\text{pág. 169})$$

$$(52) \quad \log k'a = 3,64 + 1,158 \times 10^{-4} G \quad (\text{pág. 169})$$

$$(53) \quad \log k'a = 3,64 + 1,215 \times 10^{-4} G \quad (\text{pág. 169})$$

$$(54) \quad \log k'a = 3,60 + 1,360 \times 10^{-4} G \quad (\text{pág. 170})$$

$$(55) \quad \log k'a = 3,73 - 0,135 \times 10^{-4} L + \quad (\text{pág. 170}) \\ + (0,892 + 0,439 \times 10^{-4} L) 10^{-4} G$$

$$(56) \quad \log k'a = 3,65 + (0,892 + 0,439 \times 10^{-4} L) 10^{-4} G \quad (\text{pág. 171})$$

$$(57) \quad k'a = 5,2^{0,80} L^{0,15} \quad (\text{pág. 177})$$

$$(58) \quad h_G a = 1,28 G^{0,80} L^{0,15} \quad (\text{pág. 178})$$

$$(59) \quad \log h a = 4,087 - 0,125 \times 10^{-4} G + \\ + (0,860 - 0,402 \times 10^{-4} G) 10^{-4} L \quad (\text{pág. 184})$$

$$(60) \quad \log h_L a = 4,02 + 0,64 \times 10^{-4} L \quad (\text{pág. 190})$$

$$(61) \quad h_{La} = 28,6 L^{0,8} \quad (\text{pág. 199})$$

$$(62) \quad M_G = 446 \sqrt{\Delta h_{\text{vent}}} \cdot F \quad (\text{pág. 217})$$

$$(63) \quad F = \sqrt{\frac{\pi}{T \cdot \delta} \cdot \frac{(B-1)}{K \cdot B}} \cdot \text{donde } B = \frac{\pi}{w} \quad (\text{pág. 218})$$

$$B = \frac{B}{B + \frac{K \cdot B}{(B-1)}}$$

$$(64) \quad M_G = 1,194 \cdot \sqrt{\Delta h_p} \cdot F \quad (\text{pág. 222})$$

$$(65) \quad M_L = 328,5 \cdot \sqrt{\Delta h_L} \quad (\text{pág. 230})$$

$$(66) \quad \frac{x_s - x}{t_s - t} = - \frac{s}{r_s} = \frac{x_w - x}{t_w - t} \quad (\text{pág. 252})$$

$$(67) \quad x = \frac{\frac{0,622 \cdot p_s}{\pi - p_s} \cdot r_s - 0,24 (t - t_w)}{r_s + 0,46 (t - t_w)} \quad (\text{pág. 252})$$

$$(68) \quad i_G = C_{AS} \cdot t + (r_o + C_V \cdot t) \cdot x \quad (\text{pág. 262})$$

$$(69) \quad r = 751,93 - 0,5660 \cdot T \quad (\text{pág. 264})$$

$$(70) \quad x = \frac{\text{P.Mol.agua}}{\text{P.Mol.aire}} \cdot \frac{p}{\pi - p} = 0,6220 \cdot \frac{p}{\pi - p} \quad (\text{pág. 264})$$

$$(71) \quad \frac{dp}{p} = \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{T^2} dT \quad (\text{pág. 265})$$

$$(72) \quad \ln p = 55,2734 - \frac{6817,8}{T} - 5,1319 \cdot \ln T \quad (\text{pág. 265})$$

$$(73) \quad p = \frac{e^{55,2734 - \frac{6817,8}{t + 273,16}}}{(t + 273,16)^{5,1319}} \quad (\text{pág. 265})$$

(74)

$$i_G = 0,241 \cdot t_i + (371,5 + 0,2771 \cdot t_i) \cdot$$

$$\begin{aligned} & e^{55,2734} - \frac{6817,8}{t_i + 273,16} \\ & \cdot \frac{(t_i + 273,16)^{5,1319}}{e^{55,2734} - \frac{6817,8}{t_i + 273,16}} \quad (\text{pág.266}) \\ & \pi - \frac{(t_i + 273,16)^{5,1319}}{(t_i + 273,16)^{5,1319}} \end{aligned}$$

XII - INDICE DE FIGURAS

Fíg. núm.	CONCEPTO	Pág. núm.
1 -	Secciones comunes de listones utilizados en rellenos de Torres de enfriamiento de agua	9
2 -	Esquema del proceso de interacción aire-agua	15
3 -	El proceso de interacción aire-agua en el diagrama entalpía-temperatura	28-bis
4 -	El método gráfico de Mickley	35
5 -	Esquema general de la instalación y puntos de lectura de los instrumentos	48-bis
6 -	Esquema del distribuidor de agua	52
7 -	Colector de agua	53
8 -	Dispositivo para toma de muestras y temperatura del aire a la salida de la Torre	59
9 -	Psicrómetro	60
10 -	Elemento de relleno	63
11 -	Influencia de la temperatura del agua sobre $k'a$	130
12 -	Influencia de la temperatura del agua sobre h_{La}	131
13 -	Influencia de la temperatura del aire sobre $k'a$	135
14 -	Influencia de la humedad del aire sobre $k'a$	135

15	-	Influencia de la entalpía del aire sobre $k'a$	136
16	-	Influencia de la temperatura del aire sobre h_{La}	138
17	-	Influencia de la humedad del aire sobre h_{La}	138
18	-	Influencia de la entalpía del aire sobre h_{La}	139
19	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 3.400 \text{ Kg/h.m}^2$	178
20	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 4.000 \text{ Kg/h.m}^2$	179
21	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$	179
22	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 5.000 \text{ Kg/h.m}^2$	180
23	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$	180
24	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$	181
25	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 6.600 \text{ Kg/h.m}^2$	181
26	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 7.300 \text{ Kg/h.m}^2$	182
27	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre $k'a$ á $G = 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$	182
28	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 3.400 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	191
28 bis	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 3.400 \text{ Kg/h.m}^2$, (Escala semilog.)	185
29	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 4.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	192

29 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 4.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	186
30 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	192
30 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	186
31 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 5.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	193
31 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 5.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	187
32 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	193
32 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	187
33 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	194
33 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	188
34 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 6.600 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	194
34 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 6.600 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	188
35 -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 7.300 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	195
35 bis -	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 7.300 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	189

36	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	195
36 bis	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre h_{La} á $G = 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	189
37	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	172
37 bis	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	166
38	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	173
38 bis	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	167
39	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	173
39 bis	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	167
40	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 8.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	174
40 bis	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 8.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	168
41	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 10.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala doble log.)	174
41 bis	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre $k'a$ á $L = 10.100 \text{ Kg/h.m}^2$. (Escala semilog.)	168
42	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} á $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$	196

43	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} á $G = 4.300 \text{ Kg/h.m}$	197
44	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} á $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}$	197
45	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} á $G = 8.100 \text{ Kg/h.m}$	198
46	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre h_{La} á $G = 10.100 \text{ Kg/h.m}$	198
47	-	Curva característica del ventilador	215
48	-	Esquema del venturímetro	218
49	-	Factor de corrección, F , del venturí- metro	220
50	-	Calibrado del venturímetro por trans- versas de Pitot	224
51	-	Calibrado del diafragma	231
52	-	Calibrado de los termómetros para medir t_{s1} , t_{s2} , t_{2f} , t_1 , T_{2f} , t_{w1} , T_{12} , t_{w2} y t_{amb}	233
53	-	Calibrado de los termómetros para medir t_{2di} , T_{2d} , T_{11} , T_{2dd} , y dos de reserva.	234
54	-	Diagrama psicrométrico a 760 mm.Hg.	250
55	-	Corrección psicrométrica por la pre- sión	251

XIII - INDICE DE TABLAS

Tabla núm.	CONCEPTO	Páginas núm.
I	- Resumen bibliográfico de coeficientes individuales de transporte en procesos de interacción <u>aire-agua</u>	43
II	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 1 al 7	91 á 93
III	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 8 al 15	94 á 96
IV	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 16 al 23	97 á 99
V	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 24 al 31	100 á 102
VI	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 32 al 39	103 á 105
VII	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 40 al 47	106 á 108
VIII	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 48 al 55	109 y 110
IX	- Influencia de los caudales de aire-agua. Números 56 al 63	111 y 112
X	- Influencia de las condiciones del agua. Números 64 al 65. Influencia de las condiciones del aire. Números 67 al 71	113 y 114
XI	- Influencia de las condiciones del aire. Números 72 al 79	115 y 116
XII	- Influencia de las condiciones del aire. Números 80 al 85. Influencia de las condiciones del agua. Números 86 y 87	117 y 118

XIII	-	Influencia de la temperatura del agua. Números 88 al 95	119 y 120
XIV	-	Influencia de la temperatura del agua. Números 96 al 100. Influencia de las condiciones del aire. Números 101 al 103	121 y 122
XV	-	Estudio de los efectos finales. Números 104 al 110	123 y 124
XVI	-	Influencia de la temperatura sobre los tres coeficientes	128
XVII	-	Influencia de las condiciones del aire sobre los tres coeficientes	133
XVIII	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 3.000 \text{ Kg/h.m}^2$	143
XIX	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 4.300 \text{ Kg/h.m}^2$	144 y 145
XX	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$	146 y 147
XXI	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 8.100 \text{ Kg/h.m}^2$	148 y 149
XXII	-	Influencia de la velocidad másica del aire sobre los tres coeficientes, a $L = 10.100 \text{ Kg/h.m}^2$	150
XXIII	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 3.400 \text{ Kg/h.m}^2$	151
XXIV	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 4.000 \text{ Kg/h.m}^2$	152
XXV	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 4.400 \text{ Kg/h.m}^2$	153

XXVI	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 5.000 \text{ Kg/h.m}^2$	154
XXVII	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 5.500 \text{ Kg/h.m}^2$	155
XXVIII	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 6.100 \text{ Kg/h.m}^2$	156
XXIX	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 6.600 \text{ Kg/h.m}^2$	157 y 158
XXX	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 7.300 \text{ Kg/h.m}^2$	159
XXXI	-	Influencia de la velocidad másica del agua sobre los tres coeficientes, a $G = 7.800 \text{ Kg/h.m}^2$	160
XXXII	-	Estudio de los efectos finales	202
XXXIII	-	Calibrado del venturímetro	223
XXXIV	-	Calibrado del diafragma	228 y 229
XXXV	-	Prueba de comprobación de los psicrómetros	255
XXXVI	-	Programa 1. Cálculo de la función $i_{G_i} = f(t_i,)$	268
XXXVII	-	Programa 2. Tanteo gráfico y construcción de Mickley	269 á 271
XXXVIII	-	Programa 3. Cálculo de la integral y datos finales	272
XXXIX	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura a 704 mm.Hg.	277
XL	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura a 705 mm.Hg.	278

XLI	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 706 mm.Hg.	279
XLII	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 707 mm.Hg.	280
XLIII	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 708 mm.Hg.	281
XLIV	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 709 mm.Hg.	282
XLV	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 710 mm.Hg.	283
XLVI	-	Datos de equilibrio entalpía/temperatura á 711 mm.Hg.	284
XLVII	-	Experimento 42 - Datos experimentales .	293
XLVIII	-	Experimento 42 - Balance entálpico	295
XLIX	-	Experimento 42 - Construcción de Mickley y cálculos finales	299
L	-	Experimento 42 - Listado de la cinta de salida S-2-705/42	301 á 304
LI	-	Experimento 42 - Resultados finales dados por el ordenador	305
LII	-	Efecto de los errores de medida sobre los resultados finales	313 y 314

XIV - BIBLIOGRAFIA
=====

XIV - B I B L I O G R A F I A
=====

- (1) Merkel, F. Forschungssarb, 275 (1925).
- (2) Mickley, H.S., Chem. Eng. Prog. 45, 739 (1949)
- (3) Lewis, W.K., Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 44, 329
(1922).
- (4) Cooling Tower Institute - Houston (Texas). CTI-PFM-110A
(1958).
- (5) Berman, L.D., "Evaporative Cooling of Circulating
Water". Pergamon Press (1961).
- (6) Robinson, C.S., Mech. Eng. 45, 99 (1923)
- (7) Walker, W.H., W.K. Lewis, and W.H. Mc.Adams, "Princi-
ples of Chemical Engineering". Mc.Graw-Hill, N.Y.
(1923).
- (8) Lichtenstein, J., Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 44,
329 (1943).

- (9) Mc. Adams, W.H., "Heat Transmission", second edition, Mc.Graw Hill, N.Y. (1942).
- (10) Goode, H.H., Machol, R.E., "Systems Engineering", Mc.Graw Hill, N.Y. (1957).
- (11) Willians, T.J., "Systems Engineering for the Process Industry", Mc. Graw Hill, N.Y. (1961).
- (12) Godishnik, M., Elektrotekde. Int. 10, 149 (1961).
- (13) Campbell, D.V., Mutech. Chem. Eng. J., 8, 21 (1964).
- (14) Thomas, W.J., Houston, P., Brit. Chem. Eng., 3, 160 (1959); 4, 217 (1959).
- (15) Costa, E., Masiá, A. y Bordería, J.: An.R.Soc.Esp. Fis.Quim., LVIII (B), 725 (1962). Ibid. ibid. LIX (B), 577 (1963).
- (16) Johnstone, H.F., Singh, A.D., Ind. Eng. Chem., 29, 286 (1937).
- (17) Mc. Adams, W.H., J.B. Pohlenz, R.C. St Jonh, Chem. Eng. Prog. 45, 241 (1.949).
- (18) Yoshida, F., T. Tanaka, Ind. Eng. Chem, 43, 1467 (1951).
- (19) Cribb, G. Brit. Chem. Eng. 5, 264 (1959).

- (20) Kelly, N.W. and Sweson, L.K., Chem. Eng. Prog. 52,
263 (1956).
- (21) Jackson, J., Brit. Chem. Eng., 3, 598 (1958).